

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TARIMSAL ÜRÜNLERİN ISI POMPASI**  
**DESTEKLİ OLARAK KURUTULMASI**

**Hakan Anıl AKGÜN**

**Kasım, 2009**

**İZMİR**

# **TARIMSAL ÜRÜNLERİN ISI POMPASI DESTEKLİ OLARAK KURUTULMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Termodinamik Programı**

**Hakan Anıl AKGÜN**

**Kasım, 2009**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**HAKAN ANIL AKGÜN**, tarafından **DOÇ. DR. SERHAN KÜÇÜKA** yönetiminde hazırlanan “**TARIMSAL ÜRÜNLERİN ISI POMPASI DESTEKLİ OLARAK KURUTULMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
Doç.Dr. Serhan KÜÇÜKA  
.....

Danışman

.....  
.....  
Jüri Üyesi

.....  
.....  
Jüri Üyesi

.....  
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince yardımlarını esirgemeyen, bilgisi ve gűrűőlerini benimle paylaőan deęerli hocam ve danıőmanım Sayın Doç. Dr. Serhan Kűuka'ya sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Tecrűbesini ve bilgisini her zaman paylaőan, fikirleriyle çalıőmamı yűnlendirmemde katkıda bulunan aęabeyim ve meslektaőım Sayın Mak. Yűk. Műh. Sıtkı Mokan'a teőekkűrű bir borç bilirim.

Maddi manevi hiçbir desteęini esirgemeyen aileme ve Sayın ev. Műh. Nil Aęıl'a da ayrıca teőekkűr ederim.

Hakan Anıl AKGŪN

# TARIMSAL ÜRÜNLERİN ISI POMPASI DESTEKLİ OLARAK KURUTULMASI

## ÖZ

Bu çalışmada ısı geri kazanımı destekli bir ısı pompası kurutucusu tasarlanmıştır. Kurutma havası ve ısı pompası sisteminin termodinamik davranışı sayısal olarak modellenmiştir. Sabit hızlı kuruma periyodu esas alınarak, kurutma havası debisi, bağıl nemi ve ısı geri kazanım sistemi veriminin değişimlerinin enerji tüketimine etkisi araştırılmıştır. Sistemin çözümlenmesinde kullanılan parametreler uygulamalardan elde edilen deneyimler doğrultusunda seçilmiştir. Kurutucu giriş havasının özelliklerinin kontrol edilebilmesi için sisteme egzoz çıkışı ve taze hava girişi eklenmiştir. Isı pompasının etkinlik katsayısı sabit bir değer olarak kabul edilip hesaplar bu doğrultuda yapılmıştır. Bu amaçla sistemi çözümlleyen bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir ve ekte “kurutucu.exe” dosya ismiyle verilmiştir. Farklı durumlar bu yazılım ile çözümlenerek sistemin davranışı ve performansının değerlendirilmesi yapılmıştır.

**Anahtar sözcükler** : kurutma, ısı pompası, ısı geri kazanımlı kurutucu

# HEAT PUMP DRYING OF VARIOUS AGRICULTURAL PRODUCTS

## ABSTRACT

In this study a heat recovery assisted heat pump dryer was designed. Thermodynamic behaviour of drying medium and heat pump system was numerically modelled. With the basis of constant rate drying period, effect of heat recovery system efficiency, flow rate and relative humidity of drying medium changes on energy consumption was researched. The parameters used while solving the system were selected with the experiences obtained from applications. To control the inlet air properties of the dryer, an exhaust exit and a fresh air entrance were added. The coefficient of performance of the heat pump was selected as a fixed value and the calculations were made on this way. For this purpose a computer software was developed to solve the system and it is given in the appendix with a file name of "kurutucu.exe". Different conditions were solved with this software and the behaviour and the performance of the system evaluated.

**Keywords** : drying, heat pump, dryer with heat recovery

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Araştırması.....	2
1.1.1 Domates Kurutulması ile İlgili Çalışmalar .....	2
1.1.2 Isı Pompalı Kurutucular ile İlgili Çalışmalar.....	3
<b>BÖLÜM İKİ – KURUTMA MEKANİZMALARI VE KURUTUCULAR.....</b>	<b>6</b>
2.1 Kurutma Mekanizması.....	6
2.1.1 Katıların Nem İçeriği .....	7
2.1.2 Kuruma Hızı Eğrisi .....	11
2.1.2.1 Karakteristik Kuruma Hızı Eğrisi .....	13
2.2 Kurutucuların Sınıflandırılması ve Seçimi .....	14
2.2.1 Kurutucularda Isı Aktarım Metotları .....	17
2.2.1.1 Taşınım.....	17
2.2.1.2 İletim .....	17
2.2.1.3 Radyasyon.....	18
2.2.1.4 Dielektrik .....	18
2.2.2 Sıcaklık ve Basınç İlişkisi .....	19
2.3 Kurutma Sistemi Tipleri .....	19
2.3.1 Güneşte Kurutma .....	19
2.3.2 Kabin Tipi Kurutucular.....	20

2.3.3	Tünel Kurutucular .....	21
2.3.4	Banlı Kurutucular .....	21
2.3.5	Püskürtmeli Kurutucular .....	22
2.3.6	Dondurarak Kurutma .....	22
2.3.7	Tamburlu Kurutucular .....	23
2.3.8	Vakumda Kurutma .....	23
2.3.9	Akışkan Yataklı Kurutucular .....	24
2.3.10	Mikrodalga Kurutucular .....	25
2.3.11	Kızgın Buharlı Kurutma .....	25
<b>BÖLÜM ÜÇ – NEMLİ HAVANIN ÖZELLİKLERİ .....</b>		<b>27</b>
3.1	Gaz Karışımları ve Kısmi Basınçlar .....	27
3.2	Hava – Buhar Karışımları ve Psikometri .....	29
3.2.1	Kuru Hava ve Atmosferik Hava .....	29
3.2.2	Kuru ve Yaş Termometre Sıcaklığı .....	30
3.2.3	Havanın Özgül Nemi ve Bağıl Nemi .....	30
3.2.4	Atmosferik Havanın Entalpisi .....	31
3.2.5	Çiğ Noktası Sıcaklığı .....	32
3.2.6	Adyabatik Doyma Eğrileri .....	32
3.2.7	Duyulur Isıtma ve Soğutma .....	35
3.2.8	Soğutma ve Nem Alma .....	36
3.2.9	Hava Akışlarının Adyabatik Olarak Karıştırılması .....	38
<b>BÖLÜM DÖRT – ISI POMPALI KURUTMA VE KURUTUCULAR .....</b>		<b>40</b>
4.1	Isı Pompası Çevrimi .....	40
4.1.1	İdeal Isı Pompası Çevrimi .....	41
4.1.2	Gerçek Isı Pompası Çevrimi .....	42
4.1.3	Isı Pompası Etkinlik Katsayısı .....	44
4.2	Isı Pompalı Kurutucular .....	45
4.2.1	Avantajları ve Sınırlamaları .....	45



4.2.2	Çok Kademeli Isı Pompalı Kurutucu .....	46
4.2.3	Farklı Kurutucu Tiplerinin Isı Pompasıyla Birleştirilmesi .....	47
4.2.3.1	Akışkan Yataklı Isı Pompalı Kurutucu .....	48
4.2.3.2	Kızılötesi Destekli Isı Pompalı Kurutucu .....	48
4.2.3.3	Radyo Frekansı Destekli Isı Pompalı Kurutma.....	48
4.2.3.4	Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalı Kurutma .....	49
4.3	Kurutma Sistemlerinde Verim Tanımları .....	49
4.3.1	Kuruma Hızı (MER – Moisture Extraction Rate).....	49
4.3.2	Özgül Nem Alma Hızı (SMER – Specific Moisture Extraction Rate) ..	50
4.3.3	Nem Alma Verimi.....	50
4.3.4	Kurutucu Isıl Etkinliği .....	51
4.3.5	Kurutma Etkinliği .....	51
4.3.6	Yakıt Verimi .....	51
<b>BÖLÜM BEŞ – ISI POMPALI KURUTUCUNUN TASARIMI.....</b>		<b>52</b>
5.1	Tasarlanan Kurutma Sistemi.....	52
5.1.1	Alınan Girdi Değerleri ve Yapılan Kabuller.....	54
5.2	Hesaplar .....	56
5.2.1	Buharlaştırılacak Nem Miktarı .....	56
5.2.2	Kuruma Hızı – MER.....	57
5.2.3	Gerekli Isıl Güç.....	57
5.2.4	Kurutucu Çıkışı Havanın Özellikleri .....	58
5.2.5	Üfleme Havası Debisi .....	59
5.2.6	Soğutma ve Nem Alma Sonrası Havanın Özellikleri .....	59
5.2.7	Ön Soğutma ve Ön Isıtma Yüğü .....	60
5.2.8	Buharlaştırıcı Yüğü .....	61
5.2.9	Kompresör Kapasitesi.....	62
5.2.10	Hesapların Tekrarlanması .....	63

**BÖLÜM ALTI – BİLGİSAYAR YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ..... 70**

6.1 Bilgisayar Yazılımı .....	70
6.2 Yazılımın Geliştirilmesinde Kullanılan Eşitlikler .....	71
6.2.1 Deniz Seviyesinden Yükseklik .....	72
6.2.2 Üfleme Havaşı Debisi .....	72
6.2.3 Egzoz Havaşı Debisi .....	72
6.2.4 Kurutucu Çıkışı Havanın Entalpisi .....	73
6.2.5 Su Buharının Doyma Basıncı.....	73
6.2.6 Doymuş Suyun Entalpisi.....	73
6.2.7 Havanın Entalpisi.....	74
6.2.8 Farklı Noktaların Psikrometrik Özelliklerinin Hesaplanması.....	74

**BÖLÜM YEDİ – SAYISAL SONUÇLAR..... 76**

7.1 Yazılımdan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	76
--	----

**BÖLÜM SEKİZ – SONUÇLAR..... 80**

**KAYNAKLAR ..... 83**

**EKLER..... 85**

EK.1 Simgeler ve Kısaltmalar .....	85
EK.2 Bilgisayar Yazılımına Ait Kodlar .....	89

## **BÖLÜM BİR**

### **GİRİŞ**

Günümüzde kullandığımız dayanıklı ve dayanıksız pek çok tüketim malzemesinin üretimi aşamasında kurutma işlemi yer almaktadır. Gıda sektörü bu işlemin en çok kullanıldığı uygulama alanlarından birisidir. İnsanoğlunun geçmişte doğal yöntemlerle gerçekleştirdiği bu işlem, hazır gıda alışkanlıklarının da artmasıyla gıda üretiminin önemli bir aşamasını oluşturmuştur.

Gıda ürünlerinin kurutulmasındaki en önemli neden, ürünün uzun süre saklanılabilesinin sağlanmasıdır. Kuru gıdalar bozulmaya, bakteri üremesine, kurtlanma ve böceklenmeye karşı yaş ürünlere kıyasla daha dayanıklı olur. Islak nemliliğin %70'in altında olan ürünlerde bakteri ve diğer canlıların üremesi azalır. Aynı zamanda tadı bozan oksidasyonların ve enzim reaksiyonlarının oluşumunun önüne geçilir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta yapılan kurutma işlemlerinde ürün içinde mevcut olan bakteri ve diğer mikroorganizmaların öldürülmesi sağlanır.

Kurutma ile pek çok tarımsal ürünün tat, lezzet ve besleyiciliği artırılabilir. Bunun yanında bir takım ürünlerin sindirilebilirliği artar. Ayrıca renk ve diğer fiziksel özelliklerini de değiştirerek ürün kalitesini artırabilir.

Kurutulmuş ürünlerin nakliye ve depolanma maliyetleri yaş hallerine göre daha düşüktür. Ürünlerin kurutma sonrası kapladıkları hacim ve ağırlıkları hatırı sayılır oranda azalmaktadır. Ayrıca paketleme gibi son işlemlerin uygulanması durumunda, kuru ürünlerin endüstriyel üretim hatlarında akışı kolaylaşır, ürünlerin yapışkanlığı azalır. Yapışkanlığı azalan özellikle tahıl ürünlerinin değirmenlerde öğütülmesi daha düşük enerji gerektirdiği için maliyetleri düşürür.

Global ısınma tehlikesinin de arttığı günümüzde, enerjinin verimli kullanımı daha fazla önem kazanmıştır. Bu doğrultuda her alanda olduğu gibi kurutma sektöründe de yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Isı pompaları kurutma alanındaki bu yeniliklere örnek gösterilebilir. Isı pompaları aynı işi yapan elektrikli ısıtıcılara göre 3-4 kat

daha az enerji tüketmeleri nedeniyle, kurutma sistemlerinde gerekli ısı enerjisinin sağlanmasında kullanılabilir. Geleneksel kurutma sistemlerinde dışarı atılan egzoz havasıyla kaybedilen enerji, ısı pompalı sistemlerde geri kazanılarak sistemin toplam ısı performansını iyileştirmektedir.

Isı pompalı bir kurutucu temel olarak *ısı pompası* ve *kurutucu* olmak üzere iki sistemden oluşur. Bu tezin kapsamında öncelikle literatürde yapılan çalışmalardan bahsedilmiş, kurutma mekanizması ve nemli havanın özellikleri hakkında gerekli bilgiler verilmiş, daha sonrasında ısı pompası ve ısı pompalı kurutucu sistemleri anlatılmış, ısı pompalı bir kurutucunun termodinamik değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 1.1 Literatür Araştırması

Kurutma ve ısı pompalı kurutucularla ilgili olarak literatürde pek çok yayın bulunmaktadır. Günümüzde artan enerji ve enerjinin verimli kullanımı ihtiyacı nedeniyle, bu konuda yapılan çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır.

Isı pompalı kurutma ile kurutulabilecek bir ürün domatestir. Domatesin kuruma özellikleri ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir.

### 1.1.1 Domates Kurutulması ile İlgili Çalışmalar

Doymaz (2007) domatesin kuruma karakteristiklerini belirlemek üzere deneysel çalışma yapmıştır. Bu çalışmada domates ürününü 55, 60, 65, 70°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta 1,5 m/s hava akışına maruz bırakmıştır. Domatesler öncelikle alkaline etil oleat çözeltisine daldırılmıştır. Deneyler boyunca domateslerin ıslak nemlilik değerleri %94,5'ten %11'e düşürülmektedir.

Ürüne ön işlem yapılmasının ve uygulanan hava sıcaklığının kuruma hızına etki ettiği görmüştür. Alınan deneysel veriler ile Henderson ve Pabis modeli ile Page modeli çıkartmış, Page modelinin domatesin kuruma eğrilerini tanımlamada daha uygun olduğu sonucuna varmıştır.

Akanbi, Adeyemi ve Ojo (2006) 45, 60 ve 75°C sıcaklıktaki kurutma havasında domates dilimlerinin kuruma davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde üç adet azalan hızlı kuruma evresi gözlemlenmiştir. Bu evrelerde difüzyon katsayısı değeri  $2,72 \times 10^{-9}$  ile  $12,27 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  arasında değişmektedir. 25, 30 ve 40°C sıcaklıkta domatesin su buharı tutunma izotermi çıkarılmıştır. Bulunan değerler beş farklı tutunma modeline uygulanmıştır. 25°C 'deki domatesin tutunma davranışını GAB ve Oswin modellerinin diğerlerine göre daha iyi tanımladığını GAB modelinin en uygunu olduğunu yorumlamışlardır.

Saçılık, Keskin ve Eliçin (2006) güneş enerjili tünel kurutucuda ince katman kurutma deneyleri yapmışlardır. Deneylerde domateslerin ıslak nemlilik değerleri %93,35'ten %11,50'ye düşürülmüştür. Çalışmada ürünün 4 gün boyunca güneş enerjili tünel kurutucuda kurutması ile 5 gün boyunca doğrudan güneşte kurutması karşılaştırılmıştır.

Deneylerde sadece azalan hızlı kuruma evresinin olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler 10 adet ayrı ince katman matematiksel modeli üzerinde uygulanmış ve bu modeller uygunluk ve hata oranları açısından karşılaştırılmıştır. Güneş enerjili tünel kurutucuda kurutmanın doğrudan güneşte kurutmaya kıyasla kuruma zamanını %26,9 oranında azalttığını, ürün renginin daha kırmızı olduğunu gözlemlenmiştir. Basit yapılı ve düşük maliyetli olması nedeniyle pek çok tarımsal üründe kullanılabilecekleri yorumunu yapmışlardır.

### ***1.1.2 Isı Pompalı Kurutucular ile İlgili Çalışmalar***

Prasertsan ve P. Saen-saby (1998) tarım ürünlerin ısı pompalı kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Klima parçaları kullanarak oluşturdukları bir ısı pompalı kurutucuda çalışmışlardır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu 9 mm iç çapındaki bakır borulardan yapılmıştır. Buharlaştırıcıda borular 12 kolona 8 sıradan ve yoğuşturucuda 4 kolona 18 sıradan oluşacak şekilde yerleştirilmiştir. Toplam ısı aktarım yüzeyleri yoğuşturucuda  $61,3 \text{ m}^2$ , buharlaştırıcıda  $87,44 \text{ m}^2$ 'dir. R22

akışkanının kullanıldığı ısı pompası sisteminde 11 kW kapasiteli pistonlu kompresör kullanılmıştır. Kurutma odasının taban boyutları 1,1 x 1,1 m ve yüksekliği 2 m'dir. Tüm sistem ısı kayıplarına karşı iyi şekilde yalıtılmıştır. Sıcaklık, nem gibi hava özelliklerinin yanı sıra kompresör ve fanını elektrik tüketimlerine ilişkin veriler kayda alınmıştır. Kurutma havası sıcaklığı 50-60°C arasındadır. Kauçuk kerestesi ve muz kurutulması için deneyler yapılmıştır. Her bir ürün için farklı ilk özelliklerde dörder ayrı deney yapılmış ve yapılan deneylerin sonuçları yorumlanmıştır. Kauçuk kerestesinin son neminin %10'un altında olması durumunda MER ve SMER değerleri sırasıyla 2,854 kg/h ve 0,572 kg/kWh olarak bulunmuştur. Muzun kurutulmasında, üründen en fazla nemin uzaklaştırıldığı durumda MER ve SMER değerleri sırasıyla 2,710 kg/h ve 0,540 kg/kWh olarak hesaplanmıştır.

Rahman, Perera ve Thebaud (1998) laboratuvar ortamında kontrol edilen bir ısı pompalı kurutucuda bezelyenin kuruma kinetiklerini ve nem alma izotermelerini ölçmüşler ve modellemişlerdir. Delikli tepsilerin kullanıldığı kurutucuda hava akış yönü ince katmanın iki yüzüne paralel olarak verilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı 25°C ile 65°C, bağıl nemi 0,20 ile 0,60 arasında değiştirilmiştir. Hava hızı 1.5 m/s'dir. Model değişkenleri sıcaklık ve verileri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmada bezelyenin nem içeriğini kurutma zamanının bir fonksiyonu olarak veren bir eşitlik çıkartılmıştır.

Tosun (2009) yaptığı deneysel çalışmada ısı pompası destekli, ısı geri kazanımlı, raflı bir kurutucunun imalatını gerçekleştirmiştir. 1.3 kW gücünde bir kompresör kullanılmıştır. Toplam soğutma kapasitesi 3500 W olarak bulunmuştur. Sistemde iki kademeli yoğuşturucu kullanılmış, ısı geri kazanımı sağlamak amacıyla da bir ısı değiştiricisini ön soğutucu olarak kullanmıştır. 40, 44, 48 ve 50°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta, 2 ve 2,5 m/s hava hızında sarı elma kurutma uygulaması yapmıştır. Elma dilimlerini farklı ebatlarda keserek deneyleri tekrarlamıştır. Yapılan ölçümlerde kuruma sürelerinin sıcaklıklara göre 435 ila 285 dakika arasında değiştiği görülmüştür. SMER değerleri verilen uygulanan sıcaklıklar için sırasıyla 0,46, 0,68, 0,61 ve 0,81 olarak hesaplanmıştır. Etkinlik katsayısı değerleri de yine aynı sırayla 2,72, 2,62, 2,59 ve 2,81 olarak tespit edilmiştir. Farklı kalınlıktaki elma dilimlerinin

nem oranının zamanla değişimini belirleyen bir matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan düşük sıcaklıktaki kurutmanın ürün kalitesini olumlu etkilediği görülmüştür.

Isı pompalı kurutucu çalışma performansı, ürün karakteristiği, kuruma hızı, kurutma havası hızı ve sıcaklığı ile ısı pompası buharlaştırıcısı, yoğuşturucusu, kompresörü gibi sistem bileşenlerinin özelliklerine bağlıdır. Gözden geçirilen çalışmalarda ısı pompalı kurutucularla ilgili deneysel çalışmaların sonuçları ve performans değerleri verilmiştir. Ancak literatürde ısı pompalı kurutucularda hava debisi, nemi ve sıcaklığı gibi değişkenlerin kuruma performansına etkisini sistematik olarak inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, kurutucu giriş havasının sıcaklık, nem ve debisinin değişimi ile, kuruma çevrimi boyunca havanın termodinamik özelliklerinin değişimi sayısal olarak modellenmiştir. Geliştirilen model kullanılarak, ısı pompalı kurutucunun performansının değişimi parametrik olarak incelenmektedir. Sonuçlar, enerjinin daha verimli kullanımı ve yüksek SMER değerlerine ulaşılabilmesi için, tasarımda esas alınacak ilkeleri belirlemek yönünden yararlıdır.

## **BÖLÜM İKİ**

### **KURUTMA MEKANİZMALARI VE KURUTUCULAR**

#### **2.1 Kurutma Mekanizması**

Herhangi bir fiziksel hal durumundaki maddeden, su veya diğer sıvı maddelerin giderilmesi işlemi, kurutma işlemi olarak adlandırılır.

Kurutma, uygulamada çoğunlukla ısı yöntemleri ile gerçekleşir. Ancak enerjinin verimli kullanılması gereksinimi nedeniyle bazı ürünlerde kurutma öncesinde ya da kurutma işleminin tamamında farklı yöntemler uygulanmaktadır. Mekanik yöntemler olarak tanımlanan filtrasyon, presleme, santrifüjleme, çökeltme, eleme bunlardan bazılarıdır. Kurutma öncesinde bu yöntemlerin kullanılması, daha az enerji kullanılarak özellikle serbest nemin bir miktarının üründen uzaklaştırılmasını sağlar.

Isıl işlem ile kurutulan bir maddede aynı anda iki işlem gerçekleşir:

1. Yüzey nemi olarak tanımlanan, kurutulan madde yüzeyinde bulunan bağlanmamış halde bulunan nemin buharlaşması için çevre ortamdan gerekli ısının aktarılması
2. İçyapıda bulunan nemin, sıvı veya buhar olarak yüzeye doğru hareketi ve sonrasında ilk işlemin uygulaması

Bu işlemler kurutma işleminin enerji gereksinimini ve kuruma işlemini belirleyen başlıca etkenlerdir.

Isıl enerji maddeye iletim, taşınım, radyasyon veya bunların birleşimi ile aktarılabilir. Bu durumda ısı maddenin yüzeyinden iç tarafa doğru aktarılır. Ancak dielektrik, mikrodalga gibi yöntemlerle kurutmada ısı akışı maddenin içinden yüzeyine doğrudur. Kurutmanın devam etmesi için her iki durumda da kütle transferi maddenin içinden yüzeyine doğru olmalıdır.



Katı içerisinde kütle transferi, aşağıdaki mekanizmaların bir veya birkaçı ile gerçekleşir:

1. Eğer nemli maddenin sıcaklığı, içindeki sıvının kaynama sıcaklığından düşük ise *sıvı difüzyonu* ile
2. Eğer sıvı kütle içerisinde buharlaşır ise *buhar difüzyonu* ile
3. Katı içerisindeki buharlaşma hızı, buharın dış ortama atılma hızından fazla ise *hidrostatik basınç farkı* ile
4. Kurutma işleminin çok düşük sıcaklıklarda yapılması durumunda *Knudsen difüzyonu* ile
5. *Yüzey difüzyonu* ile

Kurutma işlemi esnasında katının fiziksel yapısının değişimiyle beraber, işlem süresine bağlı olarak kütle transfer mekanizmalarında da değişiklik olabilir.

### **2.1.1 Katıların Nem İçeriği**

Kurutma işlemiyle uzaklaştırılan sıvı veya diğer bir deyişle nem, kurutulacak madde içerisindeki iki türlü bulunabilir.

1. Bağlı nem
2. Bağlı olmayan nem

*Bağlı nem*, çözeltili gibi zayıf bir kimyasal bağ ile bağlanmış halde ya da maddenin mikro yapısına bağlanmış şekilde bulunur. Bu şekilde bağlı bulunan nem, saf halde olduğu durumdan daha düşük bir buhar basıncı uygular. Bağlı olabilecek nemden daha fazla nem ihtiva eden bir maddede ise, fazla olan nem miktarı *bağlı olmayan nem* olarak adlandırılır. *Serbest nem* ise, maddeden belli bir sıcaklıkta çekilebilecek nem miktarının tamamıdır ve serbest nem hem *bağlı*, hem de *bağlı olmayan* türde nemi içerebilir.

Kurutma işlemi uygulanan nemli bir katı madde, içindeki nemin buhar basıncı, ortamdaki gazın içindeki buharın kısmi basıncına ulaşıncaya kadar nemini kaybeder. Bu durumda katı madde ile gaz *denge* durumundadır ve katı maddenin nem içeriğine

*denge nem içeriği* denir. Tüm tarımsal ürünler sıfırdan farklı denge nemine sahiptir. Katı maddenin içerdiği nemi daha fazla azaltmak için, maddeyi daha düşük bağıl nemli bir havaya maruz bırakmak gerekir.

Katılar nem içerikleri açısından en iyi şu şekilde sınıflanırlar:

1. *Nem çekmeyen kılcal – gözenekli yapı:* Açıkça tanımlanabilen gözenek boşlukları vardır. Kılcal–gözenekli madde tamamen doymuş ise gözenek boşlukları sıvı ile dolar. Madde tamamen kuru olduğunda ise gözenekler hava ile dolar. İhmal edilebilir miktarda fiziksel olarak bağlanmış nem ihtiva ederler. Kurutma esnasında maddede büzülme-küçülme gibi fiziksel yapıda herhangi bir değişiklik olmaz. Kum, ezilmiş mineraller, nem çekmeyen kristaller, polimer parçacıklar ve bazı seramikler gibi maddeler bu sınıftadır.
2. *Nem çeken gözenekli yapı:* Net olarak görülebilen gözenekleri vardır. Büyük miktarda fiziksel olarak bağlanmış nem ihtiva ederler. Kurumanın başlangıç evrelerinde maddenin fiziksel yapısında değişiklikler oluşur. Kil, kereste ve tekstil ürünleri gibi maddeler bu sınıftadır.
3. *Koloidal (gözeneksiz) yapı:* Gözenek boşlukları bulunmaz ve bu nedenle kuruma sadece yüzeyde meydana gelir. Katının ihtiva ettiği nemin tamamı fiziksel olarak bağlıdır. Sabun, yapıştırıcı, bazı polimerler (örnek – naylon) ve çeşitli gıda ürünleri bu sınıftadır.

Su, bir katı içerisinde kılcal borularda tutunarak, hücre yapıları içerisinde çözünerek, bir katı ile çözünerek, bir katının yüzeyinde kimyasal veya fiziksel olarak absorbe edilerek bağlı hale gelebilir.

Nem çeken gözenekli yapıdaki bir malzemedeki bağlı olmayan nem, doyma nemine karşılık gelen denge nem içeriğinden fazladır. Bunun yanında nem çekmeyen yapıdaki bir maddedeki nemin tamamı bağlı değildir.

Bir katının nem içeriği, genellikle katıdaki nemin kuru maddenin ağırlığına oranı şeklinde ifade edilir. Bu orana *kuru nemlilik* adı verilir. Kuru nemliliği  $X$  ile gösterirsek:

$$X[\%] = \frac{\text{Toplam Nem Miktarı [kg]}}{\text{Toplam Kuru Madde Miktarı [kg]}} \times 100 \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanır.

Bazen, kullanılan nemli maddenin toplam kütesine oranı şeklinde ifade edilen *ıslak nemlilik* kullanılır. Bu da  $W$  ile gösterirsek:

$$W[\%] = \frac{\text{Toplam Nem Mik. [kg]}}{\text{Toplam Kuru Madde Mik. [kg] + Toplam Nem Mik. [kg]}} \times 100 \quad (2.2)$$

olarak hesaplanır. Bu iki kavram arasındaki ilişkiyi aşağıdaki bağıntı ile ifade edebiliriz:

$$X = \frac{W}{1 - W} \quad (2.3)$$

Bir sistemin çözümlenmesinde hangi nemlilikten bahsedildiği kesin olarak bilinmelidir. Maddenin nemliliğinin belirtilmesi esnasında, yüzdeli değer sonuna  $WB$  bilgisinin verilmesi, verilen nemlilik değerinin maddenin ıslak nemlik değerini ifade ettiğini gösterir. Buna dikkat edilmemesi durumunda yapılan hesaplamalar hatalı olacaktır. Bu durum, gerekli nem alma kapasitesinin hesaplanması açısından sistemin olması gerekenden farklı tasarlanmasına neden olur.

Tablo 2.1'de bazı tarım ürünlerinin kurutma öncesi ve sonrasında ıslak nemliliğe göre nem içerikleri örnek olarak verilmiştir.

Bağlı olmayan nemi uzaklaştırmak için iki yöntem kullanılır. Bunlardan biri kaynatmadır. Nemin sıcaklığının artırılmasıyla birlikte nemin buhar basıncı artar. Buhar basıncı atmosfer basıncına eşit olması durumunda kaynama oluşur ve bu sıcaklık kaynama sıcaklığı olarak tanımlanır. Ancak kurutulacak maddenin ısıya duyarlı olması çok karşılaşılan bir problemdir. Bu durumda basıncın düşürülerek kaynama sıcaklığının da düşürülmesi sağlanır. Vakumla basıncın düşürülmesi ve kaynatmanın yapılması yöntemi gerçekleştirilir.

Tablo 2.1 Bazı tarım ürünlerinin ilk ve son nem içerikleri (Ertekin, 2002)

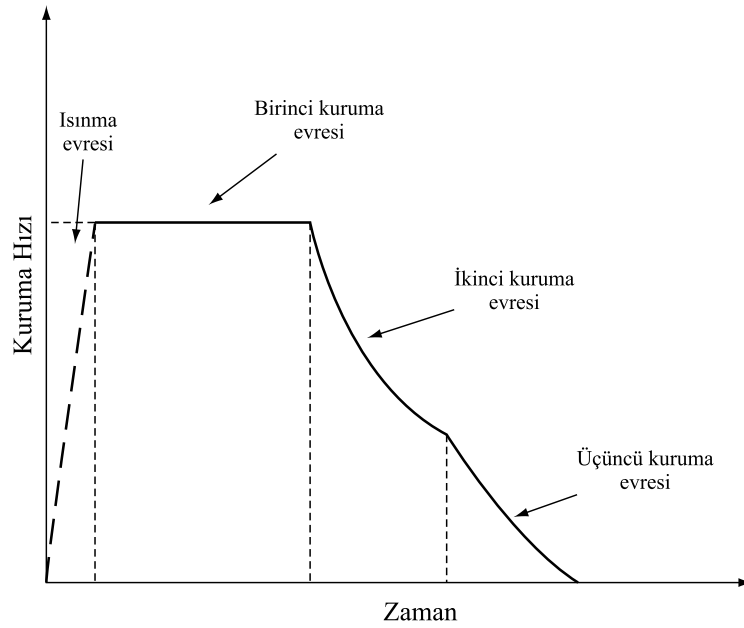
Ürün	İlk Nem İçeriği(%)	Son Nem İçeriği(%)	Ürün	İlk Nem İçeriği(%)	Son Nem İçeriği(%)
Adaçayı	62	11	Kakao	50	6-7
Armut	84	25	Kakule	80	16
Ateş çiçeği	71	11	Kaplanmış hıyar / Kırmızı turp tohumu	36	9
Bamya	81	6	Kayısı	85.3	25
Bezelye	60-70	5-10	Kekik	72.9	7.5-11.4
Biberiye	70	10	Kiraz	81	30
Dereotu	70-80	10	Lahana	90-95	5-10
Domates	93	7	Maydanoz	83	12
Elma	84.8	24	Muz	80	15
Erik	78.7	35	Nane	80	11
Fasulye	60-70	5-10	Oğulotu	77	11
Fesleğen	80	6	Patates	77	7
Frenk maydanozu	80	12	Pirekapan	70	10-13
Frenk soğanı	80-85	12	Sarıpatatya	75	7
Havuç	80-90	5-10	Sarmısak	80	4
Hindistan cevizi	45-50	5	Soğan	84	6
Hint yerelması	70	15	Şeftali	75-80	20
Hint yerelması	70	15	Şekerkamışı	40-60	20
Hurma	65	40	Şerbetçiotu	77	8
Ispanak	80	10	Üzüm	74-81.6	15-18
İncir	77.5	26	Vişne	83.7	25
K. biber	90	20	Y. biber	80	10
Kadife çiçeği	72-85	12	Yerfıstığı	45-50	13
Kahve	43-48	12	Zencefil	87-93	5

Basıncın üçlü noktanın altındaki bir değere düşürülmesi durumunda, sıvı faz ortadan kaybolur. Madde içerisindeki nem katı faza geçerek donar. Bu durumda bir miktar ısı verilmesi, buzun süblimleşerek direk olarak buhar fazına geçmesini sağlar. Dondurarak kurutmada nemin maddeden uzaklaştırılması bu yöntemle sağlanır.

Kullanılan diğer yöntem ise taşınım ile buharlaştırmadır. Bu yöntemde katıdan uzaklaştırılan nemin doyma buhar basıncı atmosfer basıncından düşüktür. Ürünün üzerinden sıcak hava geçirilmesiyle hava, ürün tarafından soğutulur ve ürün de içerdiği nemi havaya aktararak uzaklaştırılır.

### 2.1.2 Kuruma Hızı Eğrisi

Kuruma hızı eğrileri katıların kuruma davranışlarının anlaşılmasını sağlar. Kuruma esnasında katının nem içeriğindeki azalmanın zamanın bir fonksiyonu şeklinde ölçülmesi ile belirlenir. Nem çeken (higroskopik) bir ürünün, sabit kurutma koşulları sağlandığında gösterdiği tipik kuruma hızı eğrisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sabit kuruma koşullarında tipik bir kuruma hızı eğrisi

Nem ihtiva eden ürünlerin kuruma esnasında kuruma esnasındaki davranışları, içerdikleri nem miktarına göre değişiklik gösterir. *Birinci kuruma evresi* boyunca ürün yüzeyindeki serbest halde bulunan nem buharlaşır ve bu bölgede kuruma hızı sabittir. En dışta bulunan nemli yüzeyin azalması birlikte bir miktar büzülme görülebilir. Nem, sabit hızlı evrenin sonuna doğru katının içinden yüzeye doğru kılcal (kapiler) kuvvetler ile taşınır ve bu bölgede kuruma hızı sabit kalabilir. Ortalama nem içeriği miktarı, *kritik nem içeriği* miktarına eriştiği zaman, yüzeydeki

nem filminin yaklaşık olarak tamamı buharlaşmıştır. Ürünün daha fazla kurutulması yüzeyde kuru noktaların oluşmasına neden olur ve bu noktalarda yüzeydeki nem filmi tamamen ortadan kalkmıştır. Nemli olan yüzeylerdeki birim katı yüzeye karşılık gelen kuruma hızı sabit kalmasına rağmen, kuruma hızı tüm katı yüzeyine göre hesaplandığı için kuruma hızında azalma görülür. Bu bölge *ikinci kuruma evresi* veya *birinci azalan kuruma evresi* olarak adlandırılır ve yüzeydeki nem filminin tamamen buharlaşmasına kadar devam eder. Bu evre tamamen olmayabilir veya azalan hızlı kuruma devresinin tamamını oluşturabilir.

Üçüncü kuruma evresi veya ikinci azalan kuruma evresinde iç kısımlardaki nem katının yüzeyine doğru ilerler. Bu bölgede, iç kısımlar ile yüzey arasındaki nem konsantrasyonuna ilişkin oluşan gradyan, nemin yüzeye doğru hareket hızını ve buna bağlı olarak da kuruma hızını belirler. Bu noktadaki toplam ısı transferi, yüzeye olan taşınım ile ısı transferinin ve ürünün yüzeyden iç kısımlara doğru iletimle ısı transferinin toplamıdır. Nemin iç kısımlardan yüzeye difüzyonu ve yüzeyden buharlaşma ile olan kütle transferi kuruma hızını belirler.

Nem konsantrasyonunun kuruma ile azalmasıyla birlikte, madde içindeki kütle transferinin hızı da azalır. Kuruma hızı, öncesine göre daha hızlı azalmaya başlar ve *denge nem içeriği miktarına* düşünceye kadar devam eder.

Gerçekte, kuruma evreleri arasındaki geçişler, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi keskin olmaz. Bazı ürünlerin kurutma sonrası yüksek nem içeriklerinin olması gerekebilir. Böyle durumlarda kurutma esnasında yalnızca birinci evre gözükür. Ancak yavaş kuruyan maddelerin kurutulmasında, kurutma zamanının büyük bir kısmı azalan kuruma evresinde devam eder.

Sabit hızlı olan birinci kuruma evresinde kuruma hızını belirleyen etken sadece yüzey nem filminin buharlaşma hızıdır. Ancak azalan kuruma evresini etkileyen pek çok parametre vardır. Örnek olarak ürün yüzeyinde meydana gelebilecek *büzülmeler* iç kısımlardaki basınç gradyanının artarak değişmesine, bunun sonucu olarak da yüzeye kütle transferinin hızlanmasına sebep olacak ve kuruma hızının artmasını

sağlayacaktır. Bazı ürünlerde de yüksek kuruma hızları ürün yüzeyinde *kabuklaşmanın* oluşmasına sebep olur. Bu durum yüzeyde su geçirmeyen bir tabaka oluşturur ve nemin ürün içerisinde hapsolmesine neden olur. Bu sorunu engellemek için kurutma havasının bağıl nemi yükseltilir. Kurutma öncesi nem değerleri oldukça düşük olan maddelerin kurutulmasında kuruma zamanları oldukça uzar. Kurutma havasının hızı, sıcaklığı, bağıl nemi ile birlikte ürünün kalınlığı ve diğer karakteristik özellikleri bu durumda çok daha fazla önem kazanır. Bunlar gibi ürünlere ait karakteristik kuruma özellikleri, bir kurutucunun tasarlanmasında çok önemlidir.

### 2.1.2.1 Karakteristik Kuruma Hızı Eğrisi

Bir katı için farklı koşullarda kuruma hızı eğrileri çıkartılırsa, tüm eğrilerin geometrik olarak birbirlerine benzediği görülür. Bu eğriler başlangıçtaki kuruma hızına ve ortalama nem içeriğine göre normalleştirildiği takdirde, tüm bu eğriler kurutulan maddenin özelliğine bağlı *karakteristik kuruma eğrisine* yaklaşım gösterirler. Normalleştirilmiş değişkenler karakteristik kuruma hızı  $f$  ve karakteristik nem içeriği  $\phi$  aşağıda tanımlanmıştır:

$$f = \frac{N_v}{N_w} \quad (2.4)$$

$$\phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \quad (2.5)$$

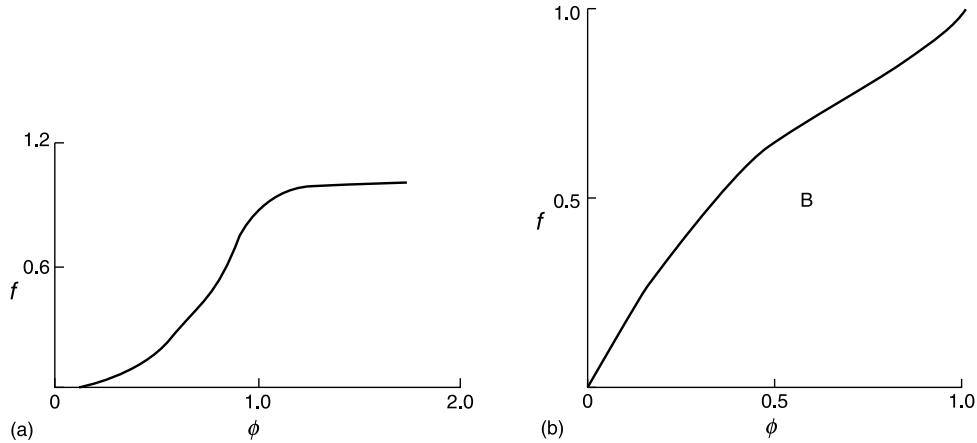
Burada  $N_v$  birim yüzey alanı için kuruma hızını,  $N_w$  başlangıçtaki kuruma hızını veya maddenin tamamen doymuş olduğu zamanki kuruma hızını,  $\bar{X}$  herhangi bir kuruma anında kurutulan ürünün ortalama nem içeriğini,  $X_{cr}$  kritik nem içeriği değerini,  $X^*$  ise denge nem içeriğini göstermektedir.

Buna göre:

- Kritik nem içeriği değeri  $X_{cr}$  değişmez ve başlangıç nem içeriği ile dış ortamdaki bağımsızdır.

- Belirli bir madde için elde edilen kuruma eğrilerinin tümü geometrik olarak benzerdir. Sonuç olarak da eğrinin şekli sadece o maddeye özgüdür ve dış ortam koşullarından bağımsızdır.

Tipik bir karakteristik kuruma eğrisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Deneysel kuruma hızları (a) Moleküler sieve 13-X parçacıkları  $X_0 = 0,27$ , Çap= 2.2 mm, Hava Hızı = 4,4 m/s,  $T_G \cong 36,5-97^\circ\text{C}$  (b) Silika-jel parçacıkları Çap= 3 mm, Hava Hızı = 1 m/s,  $T_G = 54-68^\circ\text{C}$ ,  $T_W = 25-29^\circ\text{C}$  (Mujumdar, 2006)

## 2.2 Kurutucuların Sınıflandırılması ve Seçimi

Günümüz endüstrisinde pek çok ürün, üretim aşamasında bir veya daha fazla kez kurutma işleminden geçirilmektedir (Mujumdar, 2006). Bu durum kullanılacak kurutucuların pek çok yönden değerlendirilip, seçilecek sistemin uygunluğunun denetlenmesini gerektirmektedir.

Bir kurutucunun seçiminde öncelikle ele alınması gereken ürün özellikleridir. Bu bağlamda öncelikle ürüne uygun kurutucular belirlenerek bir ön seçim yapılır. Ürünün ıslak ve kuru haldeyken sahip olduğu fiziksel özellikler ve tane boyutu gibi nicelikler bu konuda öncelikli belirleyici etkenlerdir. Ürün buharının yanıcılığı, seçilecek sistemin güvenlik açısından önemini artırır. Ayrıca bazı ürünlerin yaratabilecekleri aşındırma ve korozyon etkisi, sistemin toplam kullanım ömrünü etkilemesi nedeniyle öncelikle ele alınması gereken konulardan biridir.



Tablo 2.2 Bazı Ürünlerin Kuruma Sıcaklıkları ve Kurutma Süresi (Güngör ve Özbalta, 1997)

Malzeme Cinsi	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Hafta	Gün	Saat
Meşe Tahtaları	32 – 52	1 – 4		
Yumuşak Tahtalar	70 – 105		2 – 14	
Tuğlalar	77			30
Kahve	50 – 72			12 – 48
Kauçuk	36 – 60		2 – 6	
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65 – 92			4 – 20
Meşin ve Köseleler	26 – 38		2 – 6	
Meyveler	55 – 80			6 – 24
Uzum	60 – 65			24
Elma	I. Kademe 70 – 88			8
	II. Kademe 74			
Şeftali - Armut	68			24 – 30
Şerbetçi otu	50-65			6 – 12
Sebzeler	50-65			2 – 18
Havuç	I. Kademe 70			14 – 24
	II. Kademe 65			
Mantar	I. Kademe 44			
	II. Kademe 65			
Soğan	I. Kademe 70 – 88			10 – 15
	II. Kademe 55 – 60			
Deriler	21 – 32			2 – 150
Fırın Boyaları	105 – 175			1/4 – 6
Sabun	38 – 52			12 – 72
Tütün Yaprakları	29 – 55			12
Çay yaprakları (Fanaj veya ilk kurutma)	38			4 – 8
Çay yaprakları (Kurutma)	70 – 110			1 – 2

Ürünün karakteristik kuruma özellikleri ise uygun kurutucuların ön seçiminde en önemli rolü oynar. Ürünün ilk ve son nemi, ürün içerisindeki nemin tipi ve kuruma zamanı belirlenerek uygun sistemler gözden geçirilir. Bu noktada ürünün sıcaklığa olan hassasiyeti gözden geçirilerek, istenmeyen durumların önüne geçilebilmesini sağlamaktadır. Tablo 2.2’de bu aşamada kullanılabilecek bazı ürünlere ait kuruma sıcaklıkları ve kuruma sürelerine ilişkin bilgiler verilmiştir.

Tesis içinde ürünün işlemlere tabi tutulma sırası ve buna bağlı olarak tesisin yerleşimi, işgücü olanakları, kapasite ve üretimde süreklilik gereksinimi, kurutucunun sürekli veya süreksiz bir sistem olarak seçimini belirler. Gerekli olan ürün kütleli debisi, kurutma öncesi ve sonrasında yapılması gereken işlemler ele alınır.

Kurutucudan çıkan ürünün kalitesi, kullanılan farklı tipteki sistemlere göre de değişiklik göstermektedir. Bazı ürünlerde büzülme son ürün kalitesi etkilemez iken bazı ürünlerde bu gibi bir fiziksel değişim çok büyük önem taşır. Bunun gibi çıkan ürünün fiziksel özelliklerine ilişkin beklentiler ürünün kuruma sıcaklığının ve ısının iletim şeklinin hangi değerlerde ve ne şekilde olması gerektiği konusunda seçime yön verir. Ayrıca kurutulan ürünün son nem içeriğinin ürüne ait her bir birimde kararlı bir değerde olması ürün kalitesini etkiler. Nem içeriklerinin, ürünün tek bir biriminde de kararlı olması seçim esnasında kaliteyi belirleyen beklentiler arasındadır. Bazı durumlarda oluşan aşırı kuruma istenmeyen bir durumdur.

Oluşturulacak tesise ait mevcut olanaklar gözden geçirilir. Tesisin toplam hacmi ve bu işlem için ayırabileceği toplam hacim göz önünde bulundurulur. Kurutma ortamı olarak havanın kullanıldığı durumlarda dış ortam havasının yılın farklı zamanlarındaki sıcaklığı ve nemliliği, kurutucunun ihtiyacı olan ısı kapasiteleri belirlemede önemlidir. Isıl kapasiteleri sağlayacak olan elektrik ve yakıt gibi enerji olanaklarından hangilerinin tesiste bulunduğu veya tesisin bulunduğu coğrafyaya göre hangilerinin sağlanabileceğine bakılması gerekir.

Ön seçim yapıldıktan sonra kurutucular yaklaşık maliyet ve verimlilik açısından karşılaştırılır. Verimlilik açısından beklentileri karşılamayan veya ekonomik olmayan kurutucular bu aşamada elenir.

Eleme sonrası geriye kalan değerlendirilecek kurutucu tiplerinde denemeler gerçekleştirilir. Bu denemelerde ürüne özgü karakteristik özellikler saptanarak, kurutucunun en uygun çalışma koşullarında kurutucuyu üreten firmanın verdiği verilerin doğruluğu saptanır. Yapılan bu denemeler sonucunda elde edilen veriler

ışığında, işletme ve yatırım maliyetleri detaylı olarak incelenerek, uygulanacak kurutucu tipi belirlenir.

Kurutma sistemleri öncelikle kurutucu içerisindeki ısı aktarma metotlarına göre birbirlerinden farklılaşırlar. Burada kurutucular iletimle, taşınım, radyasyonla ve dielektrik ısı aktarım yöntemlerine göre dört farklı tipe ayrılırlar. Kurutucu içerisindeki hareket tipine göre kurutucular sınıflandırılır ise, burada tepsili, döner tamburlu, akışkan yataklı, pnömatik ve püskürtmeli kurutucular sıralanır.

### **2.2.1 Kurutucularda Isı Aktarım Metotları**

#### **2.2.1.1 Taşınım**

Taşınım, direk kurutma olarak da bilinir. Kurutucu tiplerinde en çok görülen ısı aktarım tipidir. Isı, ürünü çevreleyen ve kurutma ortamını oluşturan hava ya da başka bir gaz tarafından aktarılır. Kurutma ortamı aynı zamanda üründen buharlaşan nemi de uzaklaştırır. Çoğunlukla havanın kullanıldığı bu tipteki kurutucularda kızgın buhar durumundaki gazlar, soygazlar veya patlayıcı ve yanıcı özellikli gazlar da kullanılabilir.

Sabit hızlı kuruma evresinde ürünün sıcaklığı mevcut kurutma ortam havasının sıcaklık ve bağıl nemine karşılık gelen ıslak termometre sıcaklığına düşer. Azalan hızlı kuruma evresinde ise ürün bu sefer kurutma ortamının kuru termometre sıcaklığına kadar yükselir. Bu nedenle ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmasında bu durum göz ardı edilmemelidir. Akışkan yataklı kurutucular, püskürtmeli kurutucular ve kızgın buharlı kurutucular bu metotla çalışan kurutuculardır.

#### **2.2.1.2 İletim**

İndirek kurutma olarak da bilinir. Çok ince veya kurutma öncesi nemliliği çok fazla olan ürünler için uygundur. Buharlaştırma için gerekli olan ısı, hareketli ya da sabit olabilen ısıtılmış yüzeyler ile temas eden ürüne iletim yoluyla aktarılır.

Buharlaşan nem vakum ya da taşıyıcı bir gaz ile ortamdan uzaklaştırılır. Vakum yöntemi ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için tercih edilir.

İletimle ısı aktarımının uygulandığı kurutucularda direk kurutuculara göre ısı verim daha yüksektir. Bu nedenle bazı ürünlerin kurutulmasında her iki metot bir arada kullanılabilir. Örnek olarak, akışkan yataklı bir kurutucu içerisinde ürünle temas eden ısıtma tüpleri veya sarmalları yerleştirilmesi yoluyla ısı verim artırılarak, klasik bir akışkan yataklı kurutucunun büyüklüğünün yaklaşık üçte biri oranında büyüklüğüne olan bir kurutucuyla istenilen sonuçların elde edilmesi sağlanabilir.

Ancak yüksek kuruma hızlarına ulaşılamaması, eş dağılmayan ısı ve kütle transfer koşulları, sistemin kontrol edilebilirliği, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gibi sorunlarla iletimle kurutmada sıkça karşılaşılır.

#### *2.2.1.3 Radyasyon*

Isı aktarımı metodu olarak elektromanyetik radyasyon kullanılır. Radyasyonun dalgaboyu güneş radyasyonundan mikrodalgalara kadar olabilir. Güneş radyasyonun bir kısmı üzerine düştüğü ürün tarafından soğurulur. Soğurulan radyasyon ürünün dış yüzeyinden daha içlere etki edebilir. Kızılötesi radyasyon kağıt, tekstil gibi ince ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Radyasyonla kurutma yöntemlerinde genel olarak en büyük sorun yüksek yatırım maliyetlerinin olamasıdır.

#### *2.2.1.4 Dielektrik*

Nemli malzeme yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilmesi suretiyle, malzeme içindeki su moleküllerinin titreşmesi sağlanarak açığa çıkan ısı enerjisi kullanılır. Nemli bölgelerde üretilen ısı, kuru bölgelere kıyasla daha fazladır. Bu şekilde malzeme içinde oluşan nem gradyanı kendiliğinden düzenlenir ve her noktada eş kuruma elde edilir. Suyun buharlaşması için yüksek miktarda ısı verilmesine ve yüksek sıcaklık artışına gerek duyulmaz.

### **2.2.2 Sıcaklık ve Basınç İlişkisi**

Kurutma işlemlerin çoğu atmosfer basıncı altında gerçekleştirilir. Ancak bazı uygulamalarda kurutucu içerisindeki basıncın değişimi istenen bir durumdur. Örnek olarak vakumlama ihtiyacı gerektiren kurutucularda, kurutucunun tasarımının buna uygun şekilde yapılması gerekir. Vakumlama işlemi ısıya duyarlı, kurutulması esnasında oksijenin olmaması gereken veya yüksek sıcaklıktaki sahip olduğu aromayı kaybeden ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Bu gibi durumlar haricinde vakumla kurutma yüksek maliyeti nedeniyle tercih edilmez.

Yüksek sıcaklıkta kurutma, düşük hava hızlarında daha verimli çalışır. Yardımcı donanım gereksinimi düşüktür. Düşük sıcaklıkta çalışan kurutucuların ise boyutları daha büyüktür. Atık enerjinin kullanılabilmesi veya güneş enerjisinin kullanıldığı durumlarda uygulanır.

Dondurarak kurutma ise vakumla kurutmanın özel bir şeklidir. Tüm ürün soğutularak içindeki nemin katı faza geçmesi ve kurutma işleminin vakum altında süblimleşme ile gerçekleşmesi sağlanır. Dondurarak kurutma ile daha geniş bilgi bölüm 1.3.6'da verilmektedir.

## **2.3 Kurutma Sistemi Tipleri**

Kurutulacak ürünlerinin çeşitliliği endüstride çok sayıda kurutma sisteminin geliştirilmesine neden olmuştur. Isının enerjisinin sağlanma şekli, nemin üründen uzaklaştırılması yöntemi ve kurutulan ürünün cinsine göre kullanılan sistemler farklılaşmıştır (Mujumdar, 2006). Bu kısımda genel olarak endüstride kullanılan kurutucu tipleri ve kurutma yöntemleri incelenecektir.

### **2.3.1 Güneşte Kurutma**

Güneş ışığının sağladığı ısı enerjisi kullanılarak kurutma işlemi yapılan bu yöntem insanların çok eski zamanlardan beri kullandıkları ve günümüzde halen sıklıkla

kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ürün, ince bir tabaka halinde kurutma yapılacak yere serilerek belirli aralıklarla ürün karıştırılır veya tersine çevrilir. Kurutma işleminin tamamlanması için kayısı ve kuru üzümde olduğu gibi 3 – 4 haftaya kadar bir zaman dilimi ile bunun yanında sıcak ve kuru bir açık hava ortamı gerekmektedir. Bu durum, beklenmeyen hava koşulları ile karşılaşıldığında üreticileri zor durumda bırakabilmektedir.

Bu yöntemde kurutma esnasındaki ürün sıcaklığı ortam sıcaklığından 5 ile 15°C daha fazladır. Ürünün şekli, rengi ile ilk ve son nem miktarları kuruma zamanını ve sıcaklığını belirleyen parametrelerdir.

Güneşte kurutma genellikle tahıl ürünlerinin kurutulmasında kullanılır. Bunun yanında indirek yöntem ile güneş enerjisinden faydalanılarak buğday ve meyvelerin kurutulması uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde güneş kolektörlerinde toplanan enerji kapalı bir kurutma sisteminin kurutma havasını ısıtmada kullanılır. *Güneş enerjili kurutma sistemleri* bu prensibe göre çalışır. Ulaşılan sıcaklıklar yetersiz geldiğinde çeşitli ek ısıtma yöntemlerinden faydalanılır. Bu kurutma yöntemindeki en önemli sorunlar fazla kurumunun olması ve bazı ürünlerin bozulmaya karşı dayanıksız olmasıdır.

### **2.3.2 Kabin Tipi Kurutucular**

Kapalı bir kabin içerisinde, içinde ürünlerin yerleştirileceği raflar bulunan ufak bir yığın tipi kurutucudur. Ürünler bu raflar üzerine kurutma ortamıyla temas yüzeyi artacak şekilde yerleştirilir. Genellikle sıcak hava olan kurutma ortamından ürüne ısı aktarı taşınım yoluyla olur. Ürünün üzerinden geçen sıcak hava nemi buharlaştırarak kuruma sağlar. Tarımsal ürünlerden meyve, sebze, et ürünleri ve bunların yan ürünlerinin kurutulması için uygundur.

Kabin tipi kurutucuların en önemli özellikleri boyutlarının ufak olması ve çok yönlü olarak kullanılabilmesidir. Bu tip kurutucuların en önemli sorunu sıcak havanın tüm ürünlere eş miktarda dağıtılmasıdır. Bu sorun kurutucudan çıkan

ürünlerin son nem içeriklerinin tamamının eşit olamamasına sebep olabilir. Bu sorunun engellenmesi için kurutma ortamının hızı 2,5 m/s küçük olmamalıdır.

Normalde egzoz havasının bir kısmını sisteme geri göndermek enerji verimliliğini arttırmak açısından uygun bir yöntemdir ve sıklıkla kullanılır. Ancak nem buharı yanıcı ve patlayıcı özellik gösteren bazı endüstriyel ürünlerin kurutulması esnasında oluşan egzoz havası direk sistemden dışarı atılmalıdır.

### **2.3.3 Tünel Kurutucular**

Ürünler hareketli arabaların üzerinde bulunan raflara yerleştirilirler. Bir veya birden fazla tünel boyunca ilerleyen arabalarda bulunan ürünler, çıkışta kurumuş halde kurutucuyu terk eder. Kurutma ortamını oluşturan akışkan fanlar yardımıyla sistemde dolaştırılır. Hava akımı yürüyen arabalar ile aynı yönlü, zıt yönlü veya bunların birleşimi şeklinde olabilir. Kurutucudaki mevcut havanın bir kısmının tekrar ısıtılarak kullanılması enerji verimliliğini artırırken bunun yanında kurutucu içindeki nem kontrolünün yapılmasını sağlar.

Farklı ürünler için gerekli hava yönü, hızı, sıcaklık ve nem gibi özelliklerin sağlanması mümkündür. Basit ve çok yönlü kullanım yapısı ile diğer kurutuculardan farklılaşır.

### **2.3.4 Bantlı Kurutucular**

Ürünler hareketli konveyör bantları ya da elek telleri üzerinde yürür. Tek ya da çok katlı olabilir. Çok katlı olanlarda kurutulan ürün her bir bandın sonunda bir alt kata düşer. Her bir katta istenilen miktarda kurutma havası verilebilmesi tasarımında önemli bir husustur. Çok katlı yapının kullanılması kurutucu içerisindeki hava hızının çeşitlendirilebilmesini sağladığı gibi, ürünün bir kattan diğerine dökülmesi esnasında bir miktar karıştırılmasına sebep olduğu için tüm ürünlerde eş kuruma miktarlarının görülmesi sağlar. Aynı zamanda bu yapının kullanılması kurutucunun işletme içerisinde kapladığı alanı azaltır.

Bantlı kurutucular sürekli sistemlerdir. Kurutucu girişinde beslenen nemli ürün, kurutucu çıkışında kurumuş halde boşaltılır. Kurutma havasının sıcaklığı ve bağıl nemi gibi özellikler, kurutulacak ürünün özelliklerine göre belirlenir. Kurutucudan çıkan ürünün tamamında tüm eş kuruma miktarlarının görülmesi için bant üzerinde bulunan ürün kalınlığı oldukça düşük tutulur.

### **2.3.5 Püskürtmeli Kurutucular**

Püskürtmeli kurutucular genellikle çok ufak tanecik yapısına sahip süt tozu, kahve, sabun tozu, deterjan gibi ürünlerin kurutulmasında ve sıvı formundaki akışkanlardan nemin uzaklaştırılmasında kullanılır. Kurutulacak ürün bir püskürtücü ile kurutma ortamına gönderilir. Kurutma ortamı sıcaklığı 93 ile 760°C gibi geniş bir aralıkta değişen püskürtmeli kurutucularda, küçük tanecikli ürünlerin kuruma süresi yaklaşık 5 ile 15 saniye arasındadır. Kurutma süresinin bu kadar kısa olması, ısıya duyarlı olan ürünlerin kurutulmasına olanak sağlar. Bir ısı değiştirgeci veya direk havanın içine verilen gaz veya sıvı yakıtın ateşlenmesiyle ısıtılan sıcak kurutma ortamı havası ürünün üzerinden ürün hareketine ters yönde geçirilebilir. Egzoz gazı içine karışabilen ufak tanecikli ve toz halindeki ürünler, siklon seperatör ve torba filtrelerde havadan ayrıştırılarak çıkan ürüne dahil edilir.

Ürünün tanecik boyutu, yoğunluğu, ayrılma ve toplanma şekli, kurutma havasının sıcaklığı, bağıl nemi, ısıtılma yöntemi tasarımında önemli olan noktalardır. Egzoz gazının özellikleri ürünün son nem içeriğini belirler.

### **2.3.6 Dondurarak Kurutma**

Ürünler kurutulması iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada kurutulacak ürün dondurulur. İkinci aşamada yüksek miktarda vakum uygulanarak ürün içindeki nemin kısmi basıncı üçlü noktanın altına düşürülür. Bu sayede ürün içindeki nemin sıvı fazı ortadan kalkar ve ısı alması durumunda donmuş haldeki nem süblimleşerek



direk gaz fazına geçer ve üründen uzaklaştırılır. Isı geçişi iletim veya kızılötesi radyasyon ile sağlanır.

Dondurarak kurutmada kurutma işleminin her iki aşaması da oldukça pahalı ve kurutma işleminin uzun olması nedeniyle ısıya duyarlı ve değerli ürünleri kurutulmasında uygulanır. Süblimleşme için gereken enerji buharlaşmaya göre daha yüksek olduğu halde, vakumlama işlemi maliyeti arttıran esas etkindir. Gıda endüstrisinde et ve süt ürünleri, meyve ve sebze ile bunların suları, kahve, çay, ilaç endüstrisinde farmakolojik ürünler, serumlar ve bakteri kültürlerinin kurutulmasında kullanılır.

### **2.3.7 Tamburlu Kurutucular**

Sıvı ya da yarı sıvı formunda olan ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Ürün birbirine temas eden ve ters yönde dönen iki adet tamburun üzerinde bulunur. Tamburların yaklaşık 300°'lik bir açıyla yaptığı hareket ile kurumayı sağlar. İçlerinden sıcak buhar verilmesiyle ya da içlerine alev verilmesiyle ısıtılan tamburlardan ürüne ısı geçişi iletimle olmaktadır. Kurumuş olan son ürün tamburların dış kısımlarında bulunan bıçaklar yardımıyla yüzeyden kazınarak tanelere veya daha geniş levhalara dilimlenir.

### **2.3.8 Vakumda Kurutma**

Vakumda kurutmada, basınç düşürülerek suyun 100°C sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta kaynaması sağlanır. Yapılacak vakumun miktarı ve kurutma sıcaklığı, ürünün sıcaklık hassasiyetine ve kuruma hızına göre değişkenlik gösterir.

Dondurarak kurutmaya kıyasla maliyeti daha düşük olmasına rağmen, diğer kurutma yöntemlerine göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, vakumda kurutma işlemi öncesinde ikinci bir kurutucu kullanılır. Kurutulacak ürünün nem miktarı geleneksel yöntemlerle bu ön kurutucuda belirli bir değere düşürüldükten sonra, vakumlu kurutucuya alınarak kurutma işlemi tamamlanır.

Genel olarak diğ er tipteki kurutuculardan farklı olarak ürüne ısı geçi Ői taşınım ile değ il, dondurarak kurutmada olduğu gibi iletim ve kızılötesi radyasyonla gerç ekleş ir. Ancak üründe bü zülmenin olduğu durumlarda temas yüzeyinin azalması nedeniyle ürünün iletim yoluyla ısı tılması verimli bir yöntem değ ildir.

Maliyetinin yüksek olması nedeniyle gıda endüstrisinde pek tercih edilmez. Kağ it sanayinde kısmen olmak üzere, askorbik asit iç eriğ inin muhafaza edilmesinin önemli olduğu meyve sularının, elma tanelerinin ve sıcaklığ a duyarlı ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Ayrıca gıda sanayinde konsantre esans ve tatlandırıcıların üretiminde kullanılmaktadır.

### **2.3.9 Akış kan Yataklı Kurutucular**

Tanecik yapılı ürününün iç erisinden yüksek hızda kurutma havası geç irilir. Hızın yüksek olması kuruma hızlarının da yüksek olmasını sağ lar. Kurutma havası kurutma odasının alt tarafından verilerek ürünün havalandırılıp karış tırılmasını ve buna bağ lı olarak da kurutucu iç indeki tüm üründe eş kurumanın oluş masını sağ lar. Sürekli bir sisteme dönüş türülmesi mümkündür. Sürekli sistemler yan yana sıralanmış odacıklardan oluş ur. İlk odacıkta çok yüksek hızla karış laş an tanecikler nemini kaybedip hafifledikten sonra hava iç inde yükseklik kazanıp diğ er odaya geç er. Bir sonraki odada daha düşük bir hızla karış laş ır ve aynı iş lem diğ er odalara doç ru devam eder. Hava hızı her odada belirli bir miktar azalır ve son olarak ürün kurutucudan boş altılır. Burada hızlar taneciklerin boyutları ve ürünün yoğunluğ una göre belirlenir. Odalara koyulabilen pencereler baş langıç ta akış kanlaş tırılmanın gözlenebilmesine yardımcı olur. Eğ er bu mümkün değ il ise, hava hızı arttırılarak basınç düş üm eğ risinin dü zleş tiğ i noktadan itibaren akış kanlaş ma bölgesi belirlenir.

Akış kanlaş tırılmış yataklı kurutucularda kurutulabilecek bir gıda ürününün tanecik şek illeri ve boyutları birbirlerine benzer olmalıdır. Tanecik boyutları 10µm ile 20mm arasında değ iş ir. Kurutucu giriş inde topak halinde olabilen ürünlerin, akış kanlaş tırılmış yatakta kolaylıkla dağ ılabilir olması gerekir. Toz halinde satılan gıda ürünleriyle kö mür, kireç taş ı, plastik ilaç tabletlerinin kurutulmasına uygundur.

### **2.3.10 Mikrodalga Kurutucular**

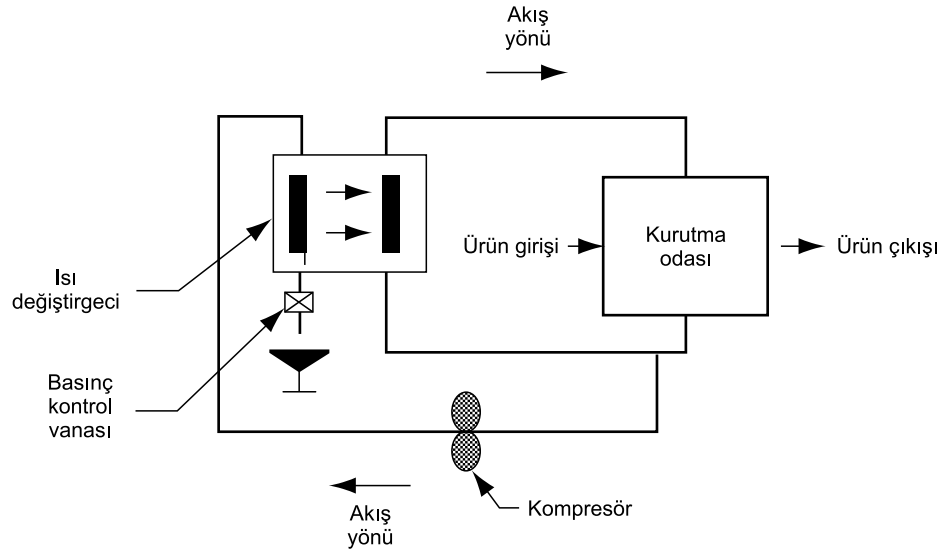
Mikrodalga kurutmada ürün çok yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalara maruz bırakılır. Mikrodalga üreteçleri 100MHz ve 900–2500MHz aralığındaki frekanslarda dalgalar üretirler. Bu yüksek frekanslı dalgalar ürün içerisindeki su moleküllerinin polarize olmasına ve dizilimlerinin değişmesine neden olur. Bu değişim sırasında açığa çıkan ısı enerjisi nemin üründen uzaklaşmasını sağlar. Üretilen dalgaların frekanslarının yükselmesi, sistemin ürettiği ısı enerjisinin azalmasına neden olur.

Son dönemde mikrodalğanın kurutmada kullanılması üzerine yeni sistemler geliştirilmiştir. Bunların en çok bilineni makarna ürünlerinin kurutulmasıdır. Makarnanın klasik sıcak havalı kurutma sistemleriyle işlenmesi hem uzun zaman almakta, hem de içerisindeki düşük sıvı difüzyonu nedeniyle ürün yüzeyinde üründe kırık ve çatlak gibi istenmeyen sonuçlar oluşmaktadır. Mikrodalga ile kurutulma durumunda merkezinden başlayarak nemini kaybeden üründe kurutmanın son safhasına kadar yüzey nemli kalmakta ve bu problemler oluşmamaktadır. Ayrıca hızlı sıcaklık artışı nedeniyle ürün içerisindeki bakteriler ölür ve bu da bir avantaj yaratmaktadır.

### **2.3.11 Kızgın Buharlı Kurutma**

Bu yöntem, kurutma için kızgın buharın kullanılması ve bu buharın üründen geçtikten sonra tekrar sıkıştırılma döngüsüne girerek ısı geri kazanımının sağlanması ve tekrar kullanılması işlemlerinin birleşimidir. Sistem Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir adet kurutma odası, bir ısı değiştirgeci, bir kompresör ve birkaç tane üfleyiciden oluşur. Kurutma odasında nemlenen kızgın buhar doymuş buhar haline gelir. Buharın bir kısmı ısı değiştirgecinde yoğunlaştırılır. Buharın diğer kısmı kompresörde sıkıştırıldıktan sonra kazandığı ısıyı kurutma buharına aktarır. Yoğunlaşmış olarak elde edilen su atılabilir ya da tesisin diğer sıcak su ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılabilir.

Bu yöntemde enerji verimi diğer kurutma yöntemlerine göre %50'ye kadar daha yüksektir. Kapalı bir sistem olması nedeniyle dışarıya atık parçacıklar ve zararlı gazlar vermez bu sayede çevreyi kirletmez. Ayrıca kurutma ortamı olarak havanın kullanılmadığı sürece oksidasyon ve diğer tepkimeler söz konusu değildir. Ancak üründe bulunan mikroorganizmaları, böcekleri ve küf mantarlarını yok etmesiyle de avantaj sağlayan yüksek kurutma sıcaklığı, bu kurutma sisteminin ısıya duyarlı malzemelere uygulanamamasına neden olur. Kompresöre gönderilecek olan buhar miktarının değiştirilmesi yoluyla kurutucunun kontrolü oldukça kolaydır. Ticari olarak tekstil ve kimya sanayilerinde çeşitli uygulamalar bulunmaktadır.



Şekil 2.3 Kızgın buharlı kurutucunun şematik gösterimi (Mujumdar, 2006)

## BÖLÜM ÜÇ

### NEMLİ HAVANIN ÖZELLİKLERİ

Dış faktörler özellikle kurutmanın ilk safhalarında katı yüzeyindeki bağlı olmayan nemin buharlaşması esnasında etki gösterir. Sıcaklık, bağıl nem, hava debisi gibi etkenler kuruma hızını değiştiren dış faktörlerdir. Örnek olarak sıcaklıkla beraber artan yüksek kuruma hızlarında büzülme etkisinin görüldüğü işlemlerde, yüzeyin aşırı kuruması durumunda ortaya çıkabilecek kabuklaşma, çatlak gibi problemlerin önüne geçmek için katı içerisindeki nem hareketine bağlı olarak yüksek bağıl nem ortamında kurutma uygulamaları yapılarak ortam özellikleri değiştirilir.

Bu bölümde bu kavramlardan bahsedilecek, bir kurutucunun tasarımında kullanılabilecek hesaplamalar anlatılacaktır.

#### 3.1 Gaz Karışımları ve Kısmi Basınçlar

Bir sıvı kuru bir gaza maruz kaldığında, gazdan aldığı ısı ile buharlaşarak kendisi de gaz fazına geçer. Bu durumda bir gaz karışımı oluşur. Bu durumda buharın ve gazın ideal gaz varsayımıyla kısmi basınçlarını şu şekilde yazılabilir:

$$P_v V = \frac{m_v}{M_v} R_u T \quad (3.1)$$

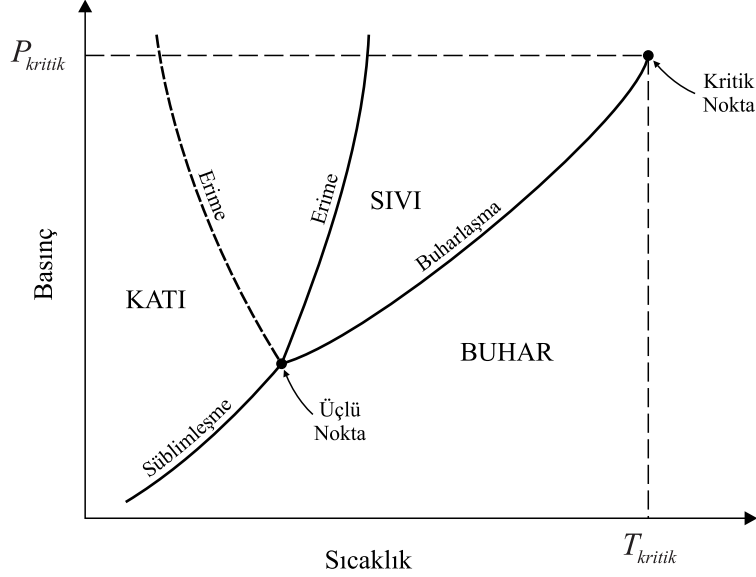
$$P_g V = \frac{m_g}{M_g} R_u T \quad (3.2)$$

Burada  $V$  ile gösterilen toplam hacim değişkeni, kısmi hacimler olarak yazılırsa bağıntılar şu şekilde değişir:

$$P_v V_v = R_u T \quad (3.3)$$

$$P_g V_g = R_u T \quad (3.4)$$

Bu bağıntılarda  $R_u$  olarak gösterilen değer universal gaz sabitidir. Burada buharın kısmi basıncı  $P_v$ 'in en büyük değeri, o sıcaklıktaki buharın doyma basıncına eşit olur. Eğer saf bir maddenin buhar basıncının sıcaklığa göre değişimi çizilirse, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bir  $P$ - $T$  diyagramı elde edilir.



Şekil 3.1 Saf maddenin  $P$ - $T$  Diyagramı

Su gibi dondurulduğunda genişleyen maddelerin  $P$ - $T$  diyagramındaki erime eğrisi, Şekil 3.1'de gösterilen kesikli çizgi yönünde farklılık gösterir. Diyagramda *üçlü nokta* olarak gösterilen değerde maddenin her üç hali de bir arada bulunur. Üçlü noktadan itibaren sıvı ve buhar fazı birbirinden ayıran *buharlaşma eğrisi* boyunca hem buhar hem de sıvı faz aynı anda görülebilir. Madde burada *doymuş sıvı* ve *doymuş buhar* olarak tanımlanır. Buharlaşma eğrisi üzerindeki her bir basınç değerine karşılık gelen sıcaklık değeri *kaynama noktası*, atmosfer basıncı değeri olan 101,3 kPa değerine karşılık gelen sıcaklık değeri de *normal kaynama noktası* olarak tanımlanır. Buharlaşma eğrisi kritik noktada sona erer. Bu noktanın üzerindeki değerlerde maddenin sıvı ile buhar fazı arasındaki yoğunluk, viskozite gibi farklılıklar gazın sahip olduğu değerlere yaklaşarak ortadan kalkar ve madde gaz olarak tanımlanır.

### 3.2 Hava – Buhar Karışımları ve Psikrometri

Bir gaz-buhar karışımı içerisindeki buharın kısmi basıncı, aynı sıcaklıktaki sıvının buhar basıncından düşük ise, bu karışımın *doymamış* olduğu tanımlanır. Kurutma uygulamalarında genellikle kurutma ortamını oluşturan gaz havadır. Psikrometri, nemli havanın termodinamik açıdan özelliklerini ve havanın içerdiği nemin çeşitli maddeler üzerinde etkisini inceleyen bir bilim dalıdır. Bu bilimin öncülüğünde mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere havanın özelliklerinin belirleyen psikrometrik diyagramlar geliştirilmiştir. Bu kısımda, kurutma işleminde gerekli olan hava miktarının ve özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan psikrometrik kavramlar açıklanacaktır.

#### 3.2.1 Kuru Hava ve Atmosferik Hava

Hava oksijen, azot ve az miktarda diğer gazların karışımından oluşan bir gazdır. Atmosferde bulunan havanın içinde denizlerden, göllerden hatta insan vücudunda bulunan suyun buharlaşması sonucunda belirli bir miktarda su buharı bulunur. Bu nedenle bu havaya *atmosferik hava* adı verilir. İçerisinde su buharı bulunmayan hava ise *kuru hava* olarak adlandırılır. Havayı kuru hava ile su buharının bir karışımı olarak ele almak ve özelliklerini içindeki nem oranına bağlı olarak hesaplamak işlemlerde kolaylık sağlar.

İklimlendirme işlemlerinde hava sıcaklığı yaklaşık -10 ile 50°C arasındadır. Bu aralıkta kuru hava mükemmel gaz olarak kabul edilebilir. Hassaslıktan bir miktar ödün vermek gerekse dahi, havadaki su buharının da mükemmel gaz olarak kabul edilmesi hesaplamalarda ciddi kolaylık sağlar. Bu durumda atmosferik hava, kuru hava ve su buharından oluşan mükemmel bir gaz karışımı olarak kabul edilebilir. Toplam atmosferik hava basıncı da kuru hava ve su buharının kısmi basınçlarının toplamı şeklinde yazılabilir:

$$P = P_a + P_v \quad (3.5)$$

Burada  $a$  indisi kuru havayı,  $v$  indisi de su buharını ifade etmektedir. Su buharının kısmi basıncı genellikle *buhar basıncı* olarak adlandırılır.

### 3.2.2 Kuru ve Yaş Termometre Sıcaklığı

Standart bir termometre ile ölçülen bir gaz – buhar karışımının sıcaklığı *kuru termometre sıcaklığı* olarak adlandırılır. Psikrometrik diyagram üzerindeki yatay eksen değerleri kuru termometre sıcaklık değerlerini gösterir.

Termometrenin ucuna ıslak bir bez sarılarak üzerinden yeterli hızda hava geçirilmesi durumunda bezden oluşan buharlaşmanın etkisiyle bezin sıcaklığında düşme gözlenir. Sıcaklıktaki düşüşün sona erdiğinde okunan değer *yaş termometre sıcaklığı* olarak adlandırılır. Kuru ve yaş termometre sıcaklık değerleri kullanılarak havanın nem oranları psikrometrik diyagram üzerinden bulunabilir.

### 3.2.3 Havanın Özgül Nemi ve Bağlı Nemi

Havadaki su buharı miktarı iki ayrı biçimde belirtilebilir. Birim kuru hava kütlelerinde bulunan birim su buharı kütlesi *özgül nem* olarak adlandırılır ve  $\omega$  ile gösterilir:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg su buharı} / \text{kg kuru hava}) \quad (3.6)$$

İdeal gaz hal denklemlerinin kullanılmasıyla özgül nemin basınca göre şu şekilde ifade edilmesi de mümkündür:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_a V / (R_a T)} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.621945 \frac{P_v}{P_a} \quad (\text{kg su buharı} / \text{kg kuru hava}) \quad (3.7)$$

$$\omega = 0.621945 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg su buharı} / \text{kg kuru hava}) \quad (3.8)$$



Burada  $P$  toplam hava basıncını ifade etmektedir. Psikrometrik diyagram üzerinde düşey eksen özgül nem değerini gösterir.

Havadaki su buharı miktarının aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en fazla su buharı miktarına oranıyla tanımlanmasına *bağlı nem* adı verilir. Bağlı nem aynı zamanda, havadaki su buharının kısmi basıncının, aynı sıcaklıktaki buharın doyma basıncına oranı şeklinde de tanımlanır ve  $\phi$  ile gösterilir:

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_g V / (R_v T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.9)$$

Yukarıda yazılan (3.8) ve (3.9) numaralı denklemler birleştirilirse özgül nem:

$$\omega = 0.621945 \frac{\phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (3.10)$$

ve bağlı nem:

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.621945 + \omega) P_g} \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir.

Kuru hava için bağlı nem değeri 0 olurken, doymuş hava için bağlı nem değeri 1'dir. Havada bulunabilecek en fazla nem miktarı, havanın sıcaklığıyla ilgilidir. Bu nedenle belli bir hacimdeki havanın sıcaklığının değiştirilmesiyle havanın özgül nemi sabit kalırken bağlı nemi değişir.

### 3.2.4 Atmosferik Havanın Entalpisi

Atmosferik hava, kuru hava ve su buharının karışımı olması nedeniyle, entalpisi de yine kuru hava ve su buharının entalpilerine göre ifade edilir ve de bunların toplamı şeklinde yazılır:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (3.12)$$

Hava – buhar karışımının bulunduğu pek çok uygulamada kuru hava miktarı sabit iken buhar miktarı değişir. Bu nedenle atmosferik havanın entalpisi kuru havanın birim kütlesi için yazılır. Eğer (3.12) numaralı eşitliğin her iki tarafını da  $m_a$  ile bölersek:

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v \quad (\text{kJ / kg kuru hava}) \quad (3.13)$$

ve (3.6) numaralı eşitliği bu denklemde yerine yazarsak:

$$h = h_a + \omega h_v \quad (\text{kJ / kg kuru hava}) \quad (3.14)$$

eşitlikleri elde edilir.  $h_v \cong h_g$  olduğu kabul edilir ise:

$$h = h_a + \omega h_g \quad (3.15)$$

ve kuru hava mükemmel gaz olarak varsayılırsa:

$$h = C_p T + \omega h_g \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır.

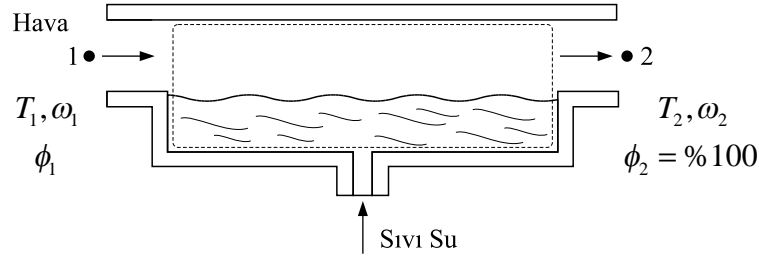
### 3.2.5 Çiğ Noktası Sıcaklığı

Havanın sabit basınç ve nemde iken soğutulması durumunda içindeki nemin yoğunlaşmasının başladığı sıcaklık *çiğ noktası sıcaklığı* olarak tanımlanır. Diğer bir tanımla suyun belirtilen basınçtaki doyma sıcaklığıdır. Yoğuşma sırasında hava doymuş haldedir ve bağıl nem %100'dür. Doymuş havanın kuru termometre sıcaklığı ile çiğ noktası sıcaklığı aynıdır.

### 3.2.6 Adyabatik Doyma Eğrileri

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi dış ortamdan tamamen yalıtılmış, içerisinde su bulunan uzun bir kanaldan oluşan bir sisteme giren doymamış havanın kanal çıkışında sıcaklığı ve nem oranı değişir. Havanın geçişi esnasında bir miktar su

buharlaşarak havanın nem oranını artırır. Buharlaşan su, buharlaşma gizli ısısını havadan sağladığı için havanın sıcaklığını düşürür. Bu esnada sisteme buharlaşan suya eşit miktarda su eklenmektedir.



Şekil 3.2 Adyabatik Doyma İşlemi

Bu sistemde kütle korunumu denklemlerini yazarsak, kuru hava kütle korunumu denklemi:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (3.17)$$

havadaki su buharı kütle korunumu denklemi:

$$\dot{m}_{su} = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) \quad (3.18)$$

şeklindedir. Enerji korunumu denklemi ise:

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_{su} h_{f2} = \dot{m}_a h_2 \quad (3.19)$$

ve

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_{f2} = h_2 \quad (3.20)$$

olarak yazılır. (3.16) numaralı eşitlik bu denklemde  $h_1$  ve  $h_2$  yerine yazılırsa:

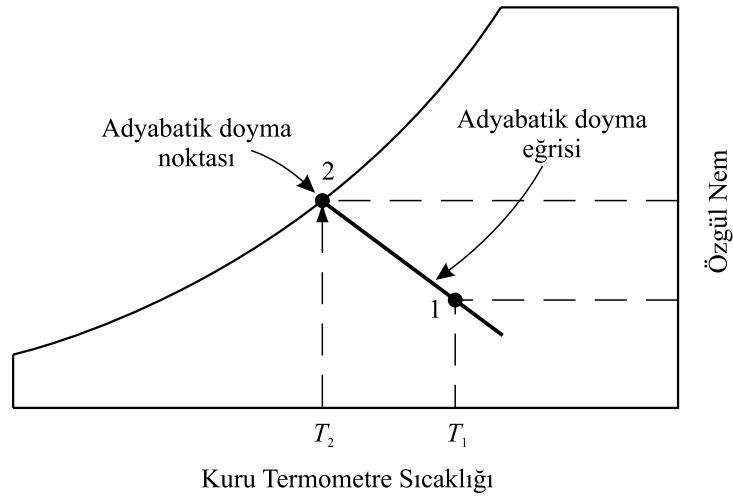
$$(C_{p1} T_1 + \omega_1 h_{g1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_{f2} = (C_{p2} T_2 + \omega_2 h_{g2}) \quad (3.21)$$

eşitliği bulunur. Eğer sistemin çalıştığı sıcaklık aralığı için  $C_{p1} = C_{p2} = C_p$  eşitliği kabul edilirse (3.21) eşitliği:

$$\omega_1 = \frac{C_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg,2}}{h_{g1} - h_{f2}} \quad (3.22)$$

olarak düzenlenir. Bu eşitlik psikrometrik diyagramda Şekil 3.3'te gösterilen *adyabatik doyma eğrisini* verir.

$$\phi = \%100$$

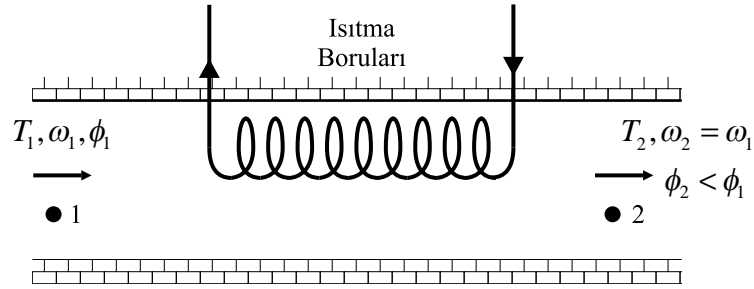


Şekil 3.3 Adyabatik doyma eğrisinin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi.

Kanalın yeterince uzun olması durumunda hava kanaldan adyabatik doyma noktasında çıkar. Bu durumda havanın bağıl nemi  $\phi = \%100$  olur ve çıkış sıcaklığı  $T_2$  de *adyabatik doyma sıcaklığı* olarak tanımlanır.

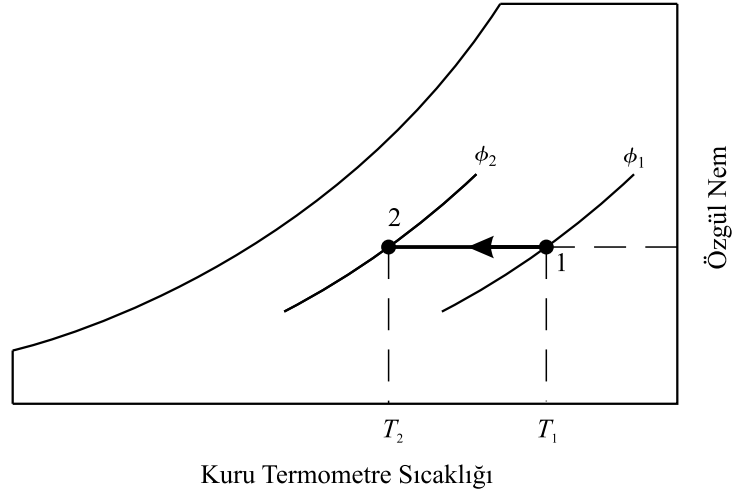
Adyabatik doyma ile yaş termometre sıcaklıkları genellikle birbirlerinden farklıdır. Isı ve kütle transferi hızları yaş termometre sıcaklığı etkiler. Fakat adyabatik doyma sıcaklığı, hava – buhar karışımıyla adyabatik doyma sıcaklığındaki suyun arasındaki denge ile ilişkilidir. Ancak atmosfer basıncında bulunan hava – buhar karışımları için adyabatik doyma eğrileri ile yaş termometre eğrileri yaklaşık olarak çakışıktır ve birbirlerine eşit kabul edilebilir. Bu durumda (3.22) eşitliğinde çıkış sıcaklığı  $T_2$  yerine yaş termometre sıcaklığı yazılabilir.

### 3.2.7 Duyulur Isıtma ve Soğutma



Şekil 3.4 Duyulur ısıtma işlemi

Yalnızca ısıtma işlemi uygulanan havanın nem miktarında bir değişiklik olmaz, özgül nem sabit kalır. Özgül nemin bu şekilde sabit kaldığı ısıtma işlemine *duyulur ısıtma* adı verilir. Isıtma işlemi psikrometrik diyagram üzerinde, özgül nemin sabit kaldığı yatay bir doğru üzerinde, kuru termometre sıcaklığının arttığı yönde oluşur. Bu işlem sırasında havanın bağıl neminde azalma gözlenir. Bunun nedeni havanın sıcaklığının artmasıyla havada bulunabilecek en fazla nem miktarının da artmasıdır.



Şekil 3.5 Duyulur ısıtmanın psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi

Özgül nemin yine sabit kaldığı, ancak duyulur ısıtmanın tersine kuru termometre sıcaklığının düşürülmesi işlemine *duyulur soğutma* adı verilir. Psikrometrik diyagramda duyulur soğutma işlemi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Nemlendirme ve nem almanın olmadığı bu iki işlemde enerjinin korunumu denklemi şu şekilde yazılır:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (3.23)$$

Aynı eşitlik birim kuru hava kütlesi için yazılırsa:

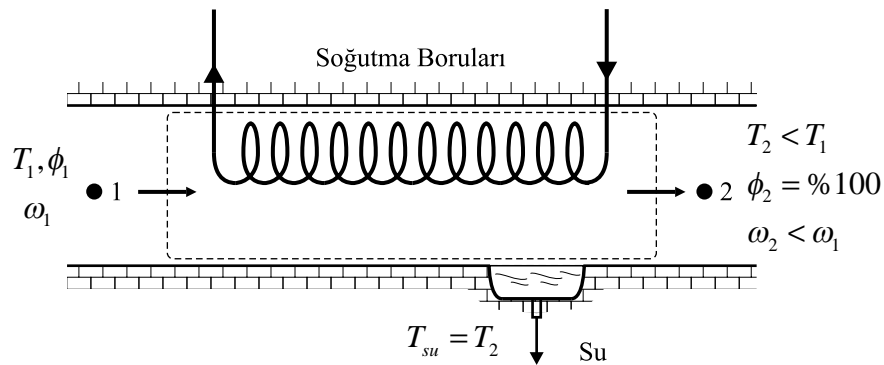
$$q = h_2 - h_1 \quad (3.24)$$

Bu eşitliklerde  $h_1$  ve  $h_2$  sırasıyla havanın giriş ve çıkıştaki birim kuru hava kütlesine göre verilen entalpileridir.

### 3.2.8 Soğutma ve Nem Alma

Havadaki nem oranının istenilenden fazla olması durumunda, nem alma işleminin yapılması gerekir. Bu işlem havanın sıcaklığının çığ noktası sıcaklığının altına düşülmesi ile gerçekleşir.

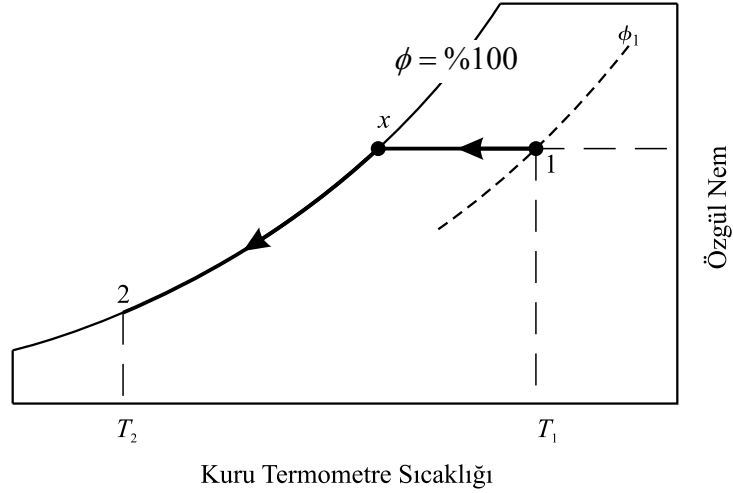
Şekil 3.6'da gösterildiği gibi hava soğutucu ısı değiştirgecinden geçirilerek sıcaklığı düşürülür. Havanın sıcaklığı çığ noktası sıcaklığına kadar düşürüldüğünde bağıl nemi  $\phi = \%100$  olur ve daha fazla soğutulması havanın içindeki nemin yoğuşmasına neden olur. Havanın çıkıştaki sıcaklığı ile aynı sıcaklıkta olduğu kabul edilen yoğuşan nem, soğutma bölümünden uzaklaştırılarak sistemden atılır.



Şekil 3.6 Soğutma ve nem alma işlemi

Bu işlem esnasında havanın özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde izlediği yol Şekil 3.7'de gösterilmiştir.  $T_1$  sıcaklığında 1 noktasında sisteme giren hava,

öncelikle çığ noktası sıcaklığına kadar soğutulurak  $X$  noktasına gelir, ardından  $\phi = \%100$  bağıl nem eğrisi üzerinde sıcaklığı düşürerek özgül nem değeri azalır.



Şekil 3.7 Soğutma ve nem almanın psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi

Soğutma ve nem alma işleminde kütle korunumu denklemleri yazılırsa, kuru hava kütesinin korunumu:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (3.25)$$

su kütesinin korunumu:

$$\dot{m}_{su} = \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2) \quad (3.26)$$

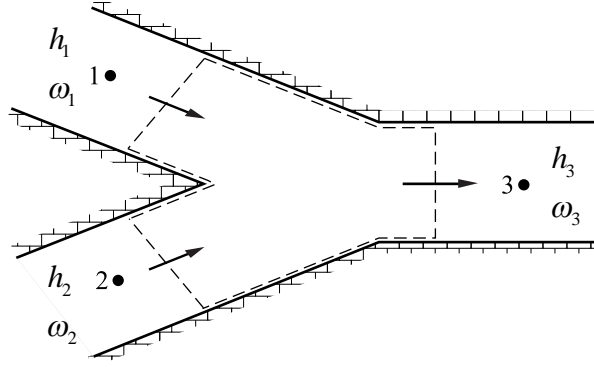
şeklindedir. Enerji korunum denklemi ise:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_1 - h_2) - \dot{m}_{su} h_{su} \quad (3.27)$$

olarak yazılır.

### 3.2.9 Hava Akışlarının Adyabatik Olarak Karıştırılması

Ayrı özellikteki iki hava akışının adyabatik olarak kabul edilen bir karıştırma işleminde potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilebilir. Ayrıca sisteme giren ya da sistemin yaptığı iş sıfırdır.



Şekil 3.8 Adyabatik karıştırma işlemi

Şekil 3.8’de gösterildiği gibi iki hava akışı karıştırılması sonucunda, yukarıda yapılan kabullere göre kütlenin korunumu denklemleri yazılırsa, kuru hava kütlesinin korunumu:

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \quad (3.28)$$

su buharı kütlesinin korunumu:

$$\omega_1 \dot{m}_{a1} + \omega_2 \dot{m}_{a2} = \omega_3 \dot{m}_{a3} \quad (3.29)$$

şeklindedir. Enerji korunum denklemi ise:

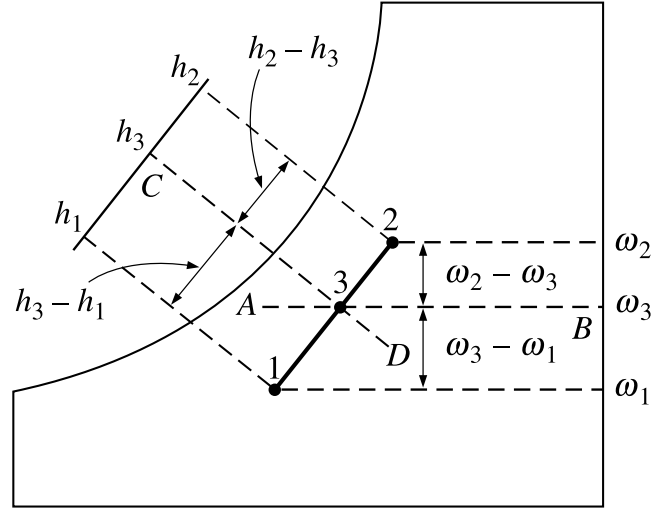
$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2 = \dot{m}_{a3} h_3 \quad (3.30)$$

olarak yazılır. Bu denklemlerdeki  $\dot{m}_{a3}$  terimi yok edilirse:

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \quad (3.31)$$



bulunur. Bu işlem Şekil 3.9’da gösterildiği gibi geometrik olarak psikrometrik diyagram üzerinde yorumlanabilir. Karışım sonucunda, karışımın hali 1 ve 2 hallerini birleştiren doğru üzerinde olmaktadır.



Şekil 3.9 Adyabatik karıştırma işleminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi (Çengel ve Boles, 2002)

1 ve 2 noktalarının oluşturduğu doğrunun,  $\phi = \%100$  doyma eğrisini kesmesi durumunda bir miktar su buharının yoğuştuğu gözlenir.

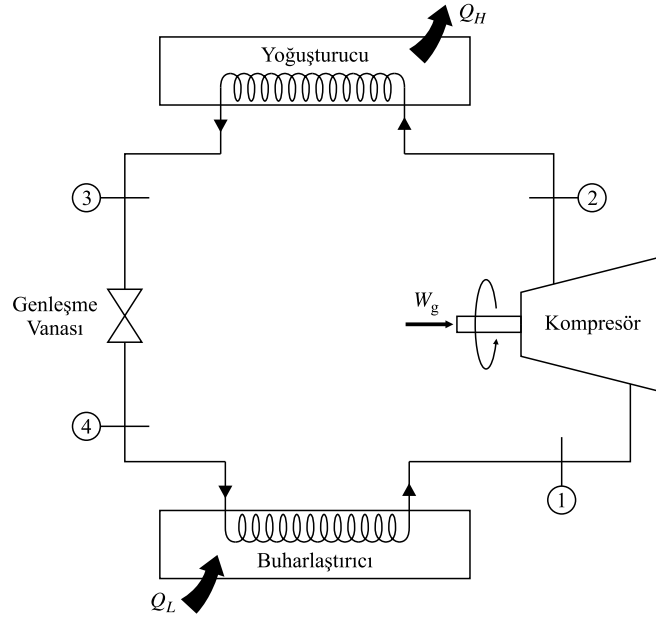
## BÖLÜM DÖRT

### ISI POMPALI KURUTMA VE KURUTUCULAR

Kurutma işlemi kullanıldığı sektörlerde toplam üretim maliyeti içerisinde önemli paya sahiptir. Sanayide kullanılan çoğu kurutma sisteminde kurutucudan çıkan sıcak ve nemli havanın bir kısmı tekrar ısıtılıp kurutucuya gönderilirken, geri kalan önemli bir kısmı atmosfere atılmaktadır. Bu durum kurutucudan çıkan havanın buharlaşma gizli ısısından ve duyulur ısısından yararlanılamamasına neden olmaktadır. Isı pompalı kurutucularda kurutucudan çıkan egzoz havasının tekrar kullanımını sağlar. Aynı zamanda kurutma havasının sıcaklık ve nem kontrolünün sağlanması için olanak sağlar.

Direk kurutucu tiplerinin çoğunda iyi tasarlanmış ısı pompaları öncelikli ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Kabin, tünel, bantlı ve akışkan yataklı kurutucularda uygulamaları görülmektedir. Ancak yüksek miktarda hava debisi gerektiren püskürtmeli veya flaş kurutucularda ısı pompalarının kullanımı uygun değildir.

#### 4.1 Isı Pompası Çevrimi

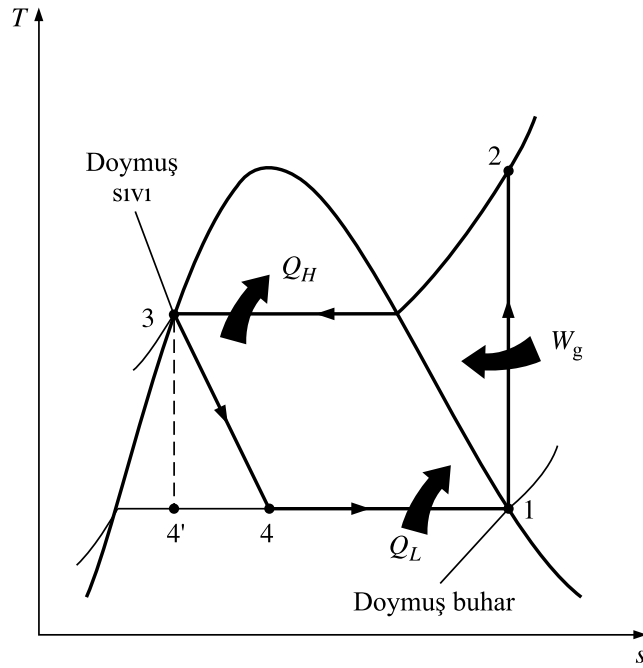


Şekil 4.1 İdeal bir ısı pompası sisteminin şematik gösterimi.

Bir ısı pompasının temel bileşenleri iki adet ısı değiştirgeci, bir adet kompresör ve bir adet genleşme vanasıdır. Kullanılan ısı değiştirgeçlerinden biri buharlaştırıcı diğeri yoğuşturucu olarak kullanılır. Basit bir ısı pompasının Şematik gōsterimi Şekil 4.1'te verilmiştir.

Isı pompası sistemi *ideal* ve *gerçek* ısı pompası çevrimi olmak üzere iki Şekilde incelenir.

#### 4.1.1 İdeal Isı Pompası Çevrimi



Şekil 4.2 İdeal ısı pompası çevriminin  $T$ - $s$  diyagramı  
(Çengel ve Boles, 2002)

İdeal bir ısı pompası çevrimine ilişkin  $T$ - $s$  diyagramı Şekil 4.2'de gōsterilmiřtir. İdeal ısı pompası çevriminde 1 numaralı durumdaki soğutucu akışkan doymuş buhar halindedir ve kompresöre girerek izantropik olarak yoğuşturucu basıncına sıkıştırılır. Bu esnada kompresör vasıtasıyla sisteme iş girdisi yapılmış olur.

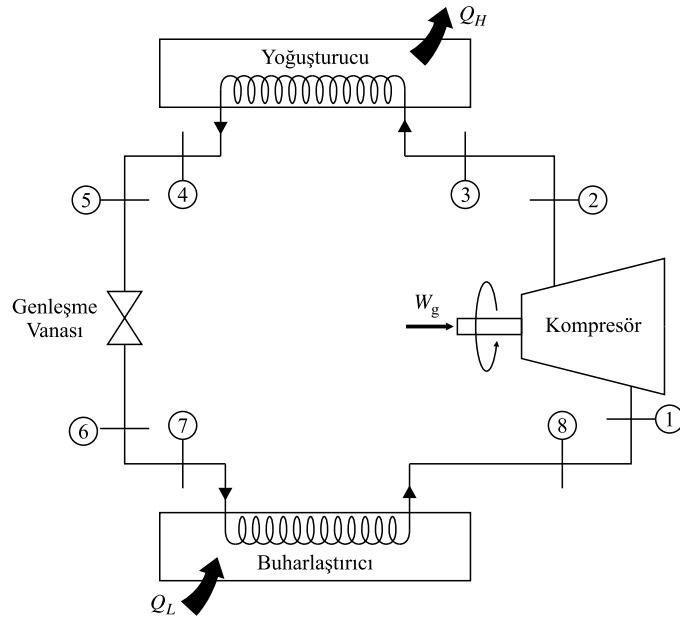
2 numaralı durumda kompresörden çıkan sıkıştırılmış soğutucu akışkan kızıgın buhar halindedir ve sıcaklığı ısıtılan ortamın sıcaklığından daha yůksektir. Kızıgın

buhar yoğuşturucuya girerek burada önce doymuş buhar haline daha sonra da doymuş sıvı haline gelir. Bu yoğuşma sırasında ısıtılan ortama ısı geçişi oluşur.

Yoğuşturucu çıkışı olan 3 numaralı durumda soğutucu akışkan doymuş sıvı haline gelmiştir ancak sıcaklığı halen ortam sıcaklığından yüksektir. Daha sonra genişleme vanasından geçen soğutucu akışkanın basıncı buharlaştırıcı basıncına kadar düşürülür.

4 numaralı durumda soğutucu akışkanın sıcaklığı ortam sıcaklığının altına düşmüştür ve buharlaştırıcıya kuruluk derecesi düşük sıvı – buhar karışımı olarak girer. Buharlaştırıcıda, soğutulan ortamdaki ısı geçişiyle birlikte tamamen buharlaşarak tekrar 1 numaralı duruma gelir.

#### 4.1.2 Gerçek Isı Pompası Çevrimi

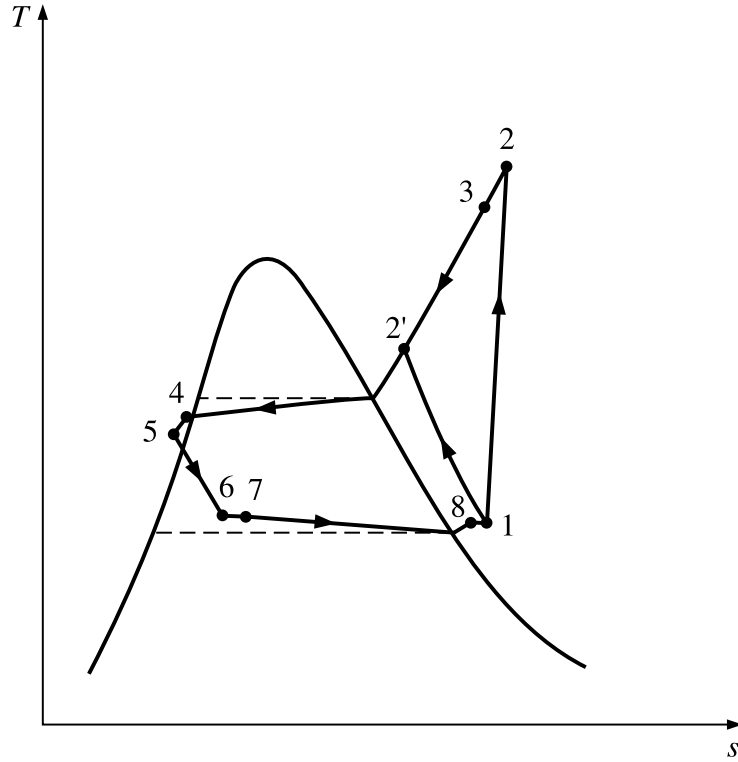


Şekil 4.3 Gerçek ısı pompası çevriminin şematik gösterimi.

Gerçek çevrim, çevrimi oluşturan bileşenlerin tersinmezliklerinden kaynaklanan nedenlerden dolayı ideal çevrime göre farklılık gösterir. Basıncın düşmesine neden olan akış sürtünmesi ve ortamla olan ısı istenmeyen ısı alışverişi tersinmezliklere

neden olur. Gerçek çevrimin akış şeması Şekil 4.3'te,  $T-s$  diyagramı da Şekil 4.4'te verilmiştir.

Gerçek çevrimde kompresör girişinde soğutucu akışkan bir miktar kızgın buhar olacak şekilde tasarlanır. Bunun nedeni, buharlaştırıcı çıkışında soğutucu akışkanın doymuş sıvı halinde olması hassas bir biçimde kontrol edilememektedir. Akışkanın kompresöre sıvı halde girmesi kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Uygulamada buharlaştırıcı ile kompresör arasındaki bağlantının genellikle uzun olması, akış sürtünmesiyle basınç düşümünün ve çevreyle ısı alışverişinin oluşmasına neden olur. Buna bağlı olarak soğutucu akışkanın özgül hacmi ve kompresör işi artar.



Şekil 4.4 Gerçek ısı pompası çevriminin  $T-s$  Diyagramı (Çengel ve Boles, 2002)

İdeal çevrimde izantropik olan kompresörde sıkıştırma işlemi gerçek çevrimde bu şekilde gerçekleşmez. Akış sürtünmesi ve çevreyle ısı alışverişi oluşur. Sürtünme entropinin artmasına neden olur. Isı alışverişinin olması, hangi yöne olduğuna bağlı olarak entropiyi arttırır veya azaltır. Sıkıştırma sırasında kompresör gövdesinin

dışarıdan su veya hava ile soğutulması durumunda işlem 1 – 2' yönünde olur. Aslında bu tercih edilen bir durumdur, çünkü kompresör işi azalır.

Akışkanın kısılma vanasına girmeden önce tamamıyla sıvı olması gerekir. Bu amaçla gerçek çevrimde soğutucu akışkan yoğuşturucudan çıktığında, akışkanın sıkıştırılmış sıvı bölgesinde olması istenir. Bunun için yoğuşturucuda aşırı soğutularak tamamen sıvı olması sağlanır. Soğutucu akışkanın aşırı soğutulması, entalpisini daha fazla düşürür ve buharlaştırıcıda ortamdaki daha çok ısı alabilmesini sağlar.

#### 4.1.3 Isı Pompası Etkinlik Katsayısı

Bir ısı pompasının verimi *etkinlik katsayısı* ile tanımlanır ve COP<sub>IP</sub> ile gösterilir. Bir ısı pompasının kullanılma nedeni, ısıtılacak olan ortama ısı vermektir. Bunun için de bu sistemde bir iş girdisinin olması gerekir. Buna göre bir ısı pompasının etkinlik katsayısı şu şekilde ifade edilir:

$$\text{COP}_{\text{IP}} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanan değer}} = \frac{\text{ortama verilen ısı}}{\text{kompresörde harcanan net iş}} = \frac{Q_H}{W_g} \quad (4.1)$$

Ortamdan çekilen ısı miktarına göre etkinlik katsayısı şu şekilde yazılır:

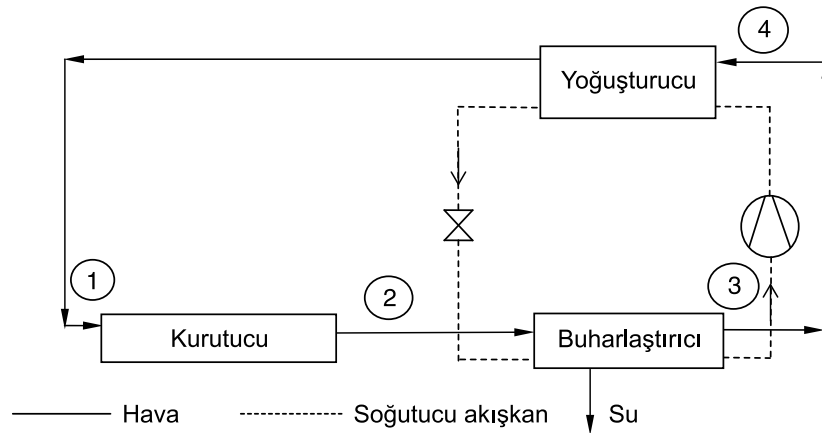
$$\text{COP}_{\text{IP}} = 1 + \frac{Q_L}{W_g} \quad (4.2)$$

Teorik olarak bir ısı pompasından elde edilebilecek en fazla verim değeri Carnot verimi ile elde edilir:

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{yoğuşturucu}}}{T_{\text{yoğuşturucu}} - T_{\text{buharlaştırıcı}}} \quad (4.3)$$

COP<sub>carnot</sub> değeri fiziksel olarak ulaşılamaz ama bir soğutma sisteminin ideal bir sistemden ne kadar uzak olduğunun anlaşılmasında bir ölçü olarak kullanılır. Pratikte, bir ısı pompasının gerçek verimi genellikle teorik Carnot veriminin %40 ile %50'si kadardır (Mujumdar, 2006).

## 4.2 Isı Pompalı Kurutucular



Şekil 4.5 Isı pompalı bir kurutma sisteminin şematik çizimi (Mujumdar, 2006)

Isı pompalı bir kurutucunun şematik çizimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Kurutucu girişinde (1) ile gösterilen kurutma havası kurutucuya girerek üründen nem alır. (2) durumunda çıkan sıcaklığı düşmüş ve nemlenmiş olan hava buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcıda öncelikle hava soğutularak sıcaklığı çığ noktası sıcaklığına kadar düşürülür. Daha fazla soğutmanın sonucunda havadaki su buharı yoğuşmaya başlar. Suyun buharlaşma gizli ısı buharlaştırıcı tarafından soğutucu akışkanın kaynaması için ısı pompası sistemine aktarılır.

Geri kazanılmış olan ısı enerjisi, kompresörden alınan enerji ile birleşerek yoğuşturucuya getirilir. Soğutulmuş ve nemi alınmış (3) durumundaki hava yoğuşturucudan mevcut enerjiyi alarak ısınır ve (1) durumunda kurutucuya tekrar gönderilir.

### 4.2.1 Avantajları ve Sınırlamaları

Isı pompalı kurutucular, kurutucudan çıkan nemli havanın enerjisinin geri kazanımı sayesinde 1,0 ile 4,0 arasında özgül nem alma hızına (SMER) sahiptir. Bu diğer uygulamalara kıyasla oldukça yüksek bir değerdir. Özgül nem alma hızına ilişkin açıklama Bölüm 4.3.2 de verilecektir.

Isı pompalı kurutucular genellikle düşük sıcakta kurutma işlemlerine uygundur. Ek ısıtma sistemlerinin de kullanılmasıyla -20 °C ile 100°C arasında çalışabilir. Ayrıca nemlendirme yapılmasıyla %15 ile %80 arası bağıl nemde çalışabilmektedir. Bu derece geniş aralıkta çalışabilme yeteneği, özellikle düşük sıcaklık ve yüksek nemde kurutulması gereken ürünlerin kalitesinin de yüksek olmasını sağlar. Kontrolünün kolay olması yüksek değerdeki ürünlerin kurutulması açısından avantaj sağladığı gibi, enerji veriminin yüksek oluşu düşük değerdeki ürünlerin kurutulmasında üretim maliyetini düşürür.

Bazı türlerinin çevreye zararlı olduğu bilinen kloroflorokarbon bileşiklerinin ısı pompası sistemlerinde soğutucu akışkan olarak kullanılması pek çok ülkede yasaklanmıştır. Soğutucu akışkan seçiminde öncelikli sınırlama bu yönde oluşur. Sistem bileşenlerinin düzenli kontrolü ve olası sızıntılar durumunda sisteme tekrar soğutucu akışkan doldurulması gibi bakım gereksinimleri vardır. Her ne kadar enerji verimleri yüksek olsa da, ilk yatırım maliyetlerinin de oldukça yüksek olması tercih edilebilecekleri sektörleri sınırlar.

#### ***4.2.2 Çok Kademeli Isı Pompalı Kurutucu***

Pratikte kullanılan ısı pompalı kurutucuların çoğu tek kademelidir. Bu sistemlerde soğutma ve nemin alındığı tek bir buharlaştırıcı bulunur. Bu durum ısı transfer yüzeyinin büyüklüğünü, dolayısıyla geri kazanılabilecek enerji miktarını sınırlar. Ayrıca, bölmelere ayrılmış bir kurutucunun, her bir bölmesinde farklı kurutma koşullarının oluşturulabilmesini sağlar.

Çok kademeleri ısı pompalarının kullanılması enerji verimini önemli ölçüde artırır. Bunun yanında, havanın nem kontrolünü kolaylaştırır. Çok kademeli bir ısı pompalı kurutucuya örnek olarak Şekil 4.6'daki sistem verilmiştir.





#### 4.2.3.1 Akışkan Yataklı Isı Pompalı Kurutucu

Kurutucu içerisindeki havanın sıcaklığı yoğuşturucunun kapasitesinin ayarlanması ile sağlanır. Havanın bağıl nemi ise bir hız kontrol cihazına bağlanan kompresörün devrinin değiştirilmesi sonucu ayarlanır.

Düşük sıcaklıkta kurutulması gereken gıda ve benzeri organik ürünlerin kurutulması için uygundur. Dondurarak kurutma ile birleştirilerek, öncelikle dondurulan üründen, ısı pompasından elde edilen düşük sıcaklıktaki taşınım havasının geçirilmesi suretiyle, ürün kalitesini belirleyen pek çok özelliğin kontrol edilmesi mümkün olur. Ayrıca yüksek kuruma hızları da sağlanabilir.

Parçacık halinde ürünlerin kurutulmasında kullanılırlar. Yüksek enerji verimliliğinin yanı sıra, döner kurutuculara kıyasla daha düşük ilk yatırım ve bakım maliyeti gerektirirler.

#### 4.2.3.2 Kızılötesi Destekli Isı Pompalı Kurutma

Kurutma hızlarında artış görülür. Kızılötesi ısı kaynağı ortam havasını ısıtmadan sadece yüzeyi ısıtır. Isıya duyarlı ürünlerin kurutulması için uygundur. Yüzey nem filminin kuruması esnasında kullanılarak, kurutmanın birinci evresinin hızlanmasını sağlar. Mevcut ısı pompalı kurutma sistemlerine eklenmesi basit ve düşük maliyetlidir.

Ürün kalitesi ve üretim hatalarının önlenmesi açısından çok iyi kontrol edilmelidir. Aşırı ısıtma risklerini ortadan kaldıracak, gerektiğinde çalışması durdurulacak bir kontrol sistemin kullanılması gereklidir.

#### 4.2.3.3 Radyo-Frekansı Destekli Isı Pompalı Kurutma

Isı pompalı normal bir kurutucuda, azalan hızlı kuruma evresinde ısı aktarımının yalnızca taşınım ile gerçekleşmesi kuruma hızını önemli ölçüde sınırlar. Radyo-

frekansı desteğinin sisteme eklenmesi ısı iletkenliğı düşük olan veya ürün kalınlığı fazla olan ürünlerin kurutulmasında kuruma hızını artırır. Kurutulan ürünün kütesinin tamamı aynı anda ısıtılır ve nemi buharlaşır. Ürün içindeki kütle transferi esnasında nemin buhar fazında olması iç yapıda bozulmaları engeller. Büzülme, ürün rengi değışimi ve çatlak gibi problemlerin oluşması engellenir. Ayrıca çıkan tüm üründe eş kuruma sağlanır

#### 4.2.3.4 Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalı Kurutma

Güneş enerjisinden faydalanılabilecek coğrafyalarda güneş enerji destekli bir ısı pompalı kurutma sisteminin uygulanması enerji verimliliğı açısından önemli yararlar sağlar. Uygulamalarda sadece ısı pompalı sisteme göre daha yüksek sıcaklıkta kurutma yapılabilir.

Güneş enerjisinin doğal bir enerji kaynağı olması nedeniyle çevre dostudur. İlk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu başlangıçta bir sorun olarak gözükse bile, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltması tercih edilmelerini sağlar.

### 4.3 Kurutma Sistemlerinde Verim Tanımları

Kurutma sistemlerinde, genel olarak sistemin verimliliğini belirlemede bazı tanımlamalardan faydalanılır. Bunlar kuruma hızı (MER), özgül nem alma hızı (SMER), nem alma verimi, kurutucu ısı etkinliğı, kurutma etkinliğı ve yakıt verimidir.

#### 4.3.1 Kuruma Hızı (MER – Moisture Extraction Rate)

Birim zamanda uzaklaştırılan nemin kütesi kurutucunun *kuruma hızını* verir ve MER ile gösterilir.

$$MER = \left( \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütesi}}{\text{Kurutma süresi}} \right) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (4.4)$$

### 4.3.2 Özgül Nem Alma Hızı (SMER – Specific Moisture Extraction Rate)

Isı pompalı kurutucularda enerji verimliliği genellikle *özümlü nem alma hızı* ile belirlenir ve SMER olarak gösterilir. Harcanan birim kWh'lik enerji için üründen uzaklaştırılan nem miktarı olarak tanımlanır.

$$SMER = \left( \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji girişi}} \right) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] \quad (4.5)$$

Isı pompalı bir kurutucunun SMER değeri hesaplanırken, *enerji girişi* terimi kompresörde harcanan enerjiye eşittir.

### 4.3.3 Nem Alma Verimi

*Nem alma verimi*, kurutma havası tarafından alınan nem miktarının, kurutma havasının kurutucu girişindeki özelliklerinin elverdiği ölçüde alabileceği en fazla nem miktarı olarak tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{(\omega_o - \omega_i)}{(\omega_a - \omega_i)} \quad (4.6)$$

Burada:

- $\omega_o$  : havanın kurutucu çıkışındaki özgül nemi,
- $\omega_i$  : havanın kurutucu girişindeki özgül nemi,
- $\omega_a$  : kurutucu girişindeki adyabatik doyma özgül nemi

dir.

Özgül nem ölçümü zor bir işlemdir. Bu nedenle, (4.6) eşitliğindeki özgül nem değeri, kütle ve hava debisi değerlerine göre yazılırsa:

$$\eta = \frac{(m_o - m_i)}{\dot{V} \rho t (\omega_a - \omega_i)} \quad (4.7)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte:

- $m_0$  :  $t = 0$  anında kurutulan ürünün kütlesini (kg)
- $m_t$  :  $t = t$  anında kurutulan ürünün kütlesini (kg)
- $\dot{V}$  : kurutma havası hacimsel debisini ( $m^3/s$ )
- $\rho$  : kurutma havası yoğunluğunu ( $kg/m^3$ )
- $t$  : toplam kurutma süresini (s)

ifade eder.

#### 4.3.4 Kurutucu Isıl Etkinliği

Ürünün kurutucu girişindeki sıcaklıkta ( $T_i$ ) bulunan nemin buharlaştırılması için gerekli enerjinin kurutucuya sağlanan toplam enerjiye oranı olarak tanımlanır ve  $\eta_t$  olarak simgelenir.

$$\eta_t = \frac{T_i \text{ sıcaklığındaki nemin buharlaştırılması için gereken enerji}}{\text{kurutucuya sağlanan toplam enerji}} \quad (4.8)$$

#### 4.3.5 Kurutma Etkinliği

Uygulama sonucunda gerçekte elde edilen buharlaşma hızının sisteme sağlanan enerjiye göre teorik olarak mümkün olan en fazla buharlaşma hızına oranıdır.

$$\eta_k = \frac{\text{gerçekte elde edilen buharlaşma hızı}}{\text{teorik olarak mümkün olan en çok buharlaşma hızı}} \quad (4.9)$$

#### 4.3.6 Yakıt Verimi

Kurutma sıcaklığında serbest suyu buharlaştırmak için gerekli enerjinin kurutucu havasının ısıtılmasında kullanılan yakıtın enerjisine oranıdır.

$$\eta_y = \frac{\text{kurutma sıcaklığında serbest suyu buharlaştırmak için gerekli enerji}}{\text{kurutucuda kullanılan yakıtın enerjisi}} \quad (4.10)$$

## **BÖLÜM BEŞ**

### **ISI POMPALI KURUTUCUNUN TASARIMI**

Isı pompalı kurutucuların en önemli özelliği enerji verimliliğinin yüksek olmasıdır. İlk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu da göz önüne alındığında, ısı pompalı bir kurutucunun yüksek verimlilikte tasarlanmasının önemi anlaşılır.

Bu çalışmada kurutulan ürün olarak domates göz önüne alınmıştır. Domatesin ilk ve son nem değerleri kullanılarak nem alma hızı hesaplanmıştır. Bu hıza bağlı olarak, kurutma sisteminin farklı bölgelerinde hava sıcaklık ve nemleri hesaplanmaktadır. Domates örnek olarak alınmış olup, kuruma periyodu boyunca sabit hızlı kuruma elde edildiği için, hesaplamalar aynı kuruma hızına sahip diğer ürünler için de aynı sonuçları verecektir.

Kurutma işlemi ürünün kuruma karakteristiklerine ve zamana bağlı olarak değişen bir işlemdir. Ancak bu çalışmada amaç, herhangi bir sabit hızlı kuruma anında kurutma havası debisi ve bağıl nemine bağlı olarak enerji tüketiminin belirlenmesidir.

#### **5.1 Tasarlanan Kurutma Sistemi**

Tasarımı yapılan ısı pompalı kurutucunun şematik çizimi Şekil 5.1’de verilmiştir. Havanın, sistemin farklı konumlarındaki özelliklerini belirlemek amacıyla her bir konum numaralandırılmıştır.

Sistemin tamamı üç adet alt sistemden oluşmaktadır. Bunlardan ilki kurutma kabinidir. Kabinde sabit hızlı kurutma işlemi yapılmaktadır.

İkinci alt sistem iki adet ısı değiştirgecinden oluşan bir ısı geri kazanım sistemidir. Kurutucudan çıkan kurutma havasının duyulur ısısının bir kısmı *ön soğutma* kısmında alınarak *ön ısıtma* kısmında tekrar havaya verilir. Isı geri kazanım



sisteminin kullanılmasının amacı, sonuncu alt sistem olan ısı pompası sistemindeki kompresör yükünü hafifleterek verimliliği arttırmaktır.

Tasarlanan ısı pompası basit bir tek kademeli ısı pompası sistemidir. Ön soğutma çıkışından gelen kurutma havası ısı pompasının *buharlaştırıcısına* gelir. Buharlaştırıcıda havanın sıcaklığı düşürülür. Sıcaklığı düşen havanın içindeki nem yoğunlaşır ve ortaya çıkan su sistemden uzaklaştırılır. Bu esnada havanın duyulur ısı ve içindeki nemin buharlaşma gizli ısı, ısı pompasında dolaşan soğutucu akışkana aktarılır. Kompresör içerisinden geçerek entalpisi artan soğutucu akışkan *yoğuşturucuda* kurutma havasına ısı vererek, kurutucu girişi için havayı tekrar ısıtmış olur.

Kurutucu girişinde kurutma havasının sıcaklık ve bağıl nem özelliklerinin tasarım esnasında belirlenen değerlere eşit olması istenmektedir. Sistemde dolaşan havadan buharlaştırıcıda çekilen ısı yoğuşturucuda kompresör işinin de eklenmesiyle havaya geri verilmektedir. Enerji dengesinin sağlanabilmesi ve kurutucu giriş sıcaklığının sabit tutulabilmesi için *egzoz havası* kısmından atılır. Atılan miktar kadar hava, dış ortamdaki havadan *taze hava* girişi üzerinden sisteme dahil edilir. Dış ortam havasının sisteme alınması toplam kurutma havası sıcaklığını aynı zamanda bağıl nemini düşürür.

### **5.1.1 Alınan Girdi Değerleri ve Yapılan Kabuller**

Sistemin öncelikli girdileri ürüne bağlı özelliklerdir. Yapılan tasarımda nemli haldeki 100 kg ürünün 10 saat içerisinde kurutulması amaçlanmıştır. Hesaplamalarda ürünün baştan sona sabit kuruma hızı gösterdiği kabul edilmiştir. Ürünün ilk ve son ıslak nemlilikleri, içerisinde yüksek miktarda nem barındıran domatesin kurutulması ile ilgili literatürdeki çalışmalardan elde edilen nemlilik değerleri alınarak sırasıyla %94,5 ve %11 olarak alınmıştır. Bu değerler Doymaz (2007) çalışmasında kullanılan domatesin ilk ve son nemlilik değerleri esas alınarak kabul edilmiştir.



Ürünün kurutucu girişindeki sıcaklığı  $T_i = 25^\circ\text{C}$  olarak kabul edilmiştir. Kurutucu çıkışında ürün sıcaklığı ise  $T_o = 55^\circ\text{C}$  olarak öngörülmüştür.

Tablo 5.1 Sistemin hesaplanmasında alınan girdi değerleri ve yapılan kabuller

Tanım	Simge	Değer
<i>Ürün Özellikleri</i>		
Kurutulacak ürün miktarı	$m_{giriş}$	100 kg
Toplam kurutma süresi	$t_{kurutma}$	10 saat
Kurutucu girişi ıslak nemlilik	$W_i$	%94,5
Kurutucu çıkışı ıslak nemlilik	$W_o$	%11
Kurutucu girişi ürün sıcaklığı	$T_i$	$25^\circ\text{C}$
Kurutucu çıkışı ürün sıcaklığı	$T_o$	$55^\circ\text{C}$
<i>Kurutma Havaı Özellikleri</i>		
Kurutucu girişi havanın sıcaklığı (9)	$T_9$	$65^\circ\text{C}$
Kurutucu girişi havanın bağıl nemi (9)	$\phi_9$	%60
Kurutucu çıkışı havanın bağıl nemi (1)	$\phi_1$	%85
Buharlaştırıcı çıkışı havanın bağıl nemi (5)	$\phi_5$	%95
<i>Diğer Kabuller</i>		
Dış ortam havasının sıcaklığı	$T_0$	$25^\circ\text{C}$
Dış ortam havasının bağıl nemi	$\phi_0$	%50
Isı pompası etkinlik katsayısı	$\eta_{IP}$	3
Isı geri kazanım ünitesinin verimi	$\eta_{GK}$	%50

Kurutma kabine giriş durumunda üfleme havaı sıcaklığı  $T_9 = 65^\circ\text{C}$  ve bağıl nemi  $\phi_9 = \%60$  olarak belirlenmiştir. Havaıın kurutucu çıkışındaki bağıl nemi ise  $\phi_1 = \%85$  olarak seçilmiştir. Kurutma havaıının kurutucu giriş ve çıkış bağıl nemlerinin yüksek seçilmesinin nedeni, birim hava kütesinin taşıdığı nem miktarını arttırarak, egzoz havaı ile sistemden çevreye olan ısı kaybını azaltmak ve aynı zamanda sistemde dolaşan havaıın debisini sınırlayarak ısı pompası yükünü düşük tutmaktır. Diğer yandan kurutucu içinde havaıın soğuk yüzeylere temas ederek yoğunlaşma olması olasılığına karşı, çıkış bağıl nemi verilen değerle sınırlandırılmıştır.

Taze hava girişi için dış ortam bağıl nemi  $\phi_0 = \%50$  ve sıcaklığı  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  kabul edilmiştir. Öngörülen modelde, tüm çevrime ısı pompası kompresöründen net olarak bir enerji girdisi olmaktadır. Bu enerji girdisi, ısı pompası etkinlik katsayısı 3 alınarak, ısı pompası yoğuşturucusunun yükünün 1/3'ü olarak hesaplanmıştır.

Isı geri kazanım ünitesinin verimi  $\eta_{GK} = \%50$  olarak kabul edilmiş ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Ayrıca ısı pompasının buharlaştırıcısı çıkışında havanın bağıl nemi pratikteki uygulamalar değerlendirilerek  $\phi_5 = \%95$  olarak kabul edilmiştir. Hesaplamaların sadeleştirilmesi amacıyla, ürünün ısıtılması için harcanan enerji miktarı, fan gücü ve çevreye olan ısı kayıpları ihmal edilerek, sistemin deniz seviyesinde çalıştığı kabul edilmiştir. Tablo 5.1'de alınan girdiler ve yapılan kabullere ilişkin değerler özet olarak verilmiştir.

## 5.2 Hesaplar

### 5.2.1 Buharlaştırılacak Nem Miktarı

Öncelikle kurutma kapasitesinin belirlenmesi gerekir. Bunun için öncelikle kurutulacak üründen uzaklaştırılacak nem miktarı hesaplanır. Üründeki toplam kuru madde miktarı:

$$m_{kuru} = m_{giriş} \times (1 - W_i) = 100 \times \left(1 - \frac{94,5}{100}\right) = 5,5 \text{ kg} \quad (5.1)$$

olarak bulunur. Kurutma kabininden çıkacak son ürün miktarı ise:

$$m_{çıkış} = \frac{m_{kuru}}{(1 - W_o)} = \frac{5,5}{(1 - \%11)} = 6,18 \text{ kg} \quad (5.2)$$

şeklinde hesaplanır. Bu durumda üründen uzaklaştırılacak toplam nem miktarı:

$$m_{buharlaştırma} = 100 - 6,18 = 93,82 \text{ kg} \quad (5.3)$$

dır.

### 5.2.2 Kuruma Hızı – MER

Kuruma hızı – MER (4.4) eşitliğine göre hesaplanarak:

$$\text{MER} = \frac{93,82}{10} = 9,382 \text{ kg/h} \quad (5.4)$$

değeri elde edilir. Güç eşitliklerinde kullanılmak üzere, üründen uzaklaştırılan nemin birim saniyedeki buharlaşma hızı yazılırsa:

$$\dot{m}_{\text{buharlaşma}} = \frac{9,382}{3600} = 2,61 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (5.5)$$

değeri hesaplanır.

### 5.2.3 Gerekli Isıl Güç

Bundan sonra nemin uzaklaştırılması için gerekli ısı güç bulunur. Bu değer aynı zamanda kurutucunun ihtiyacı olan kapasiteyi de belirleyecektir.

Öncelikle üründe bulunan nemin ürünün çıkış sıcaklığına kadar ısıtılması, ardından suyun bu sıcaklıktaki buharlaşma gizli ısısı kadar ısı verilerek buharlaştırılması gerekmektedir. Buna göre gerekli olan güce ilişkin eşitliği:

$$\dot{Q}_{\text{kurutma}} = \dot{m}_{\text{buharlaşma}} \left( \bar{C}_{p,H_2O} \Delta T + h_{fg,T_o} \right) \quad (5.6)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada ürün çıkış sıcaklığı olan  $T_o = 55^\circ\text{C}$  için suyun buharlaşma gizli ısısı:

$$h_{fg,55^\circ\text{C}} = 2370,8 \text{ kJ/kg} \quad (5.7)$$

ve de özgül ısısı:

$$C_{p,H_2O} = 4,18 \text{ kJ/kg} \quad (5.8)$$

olarak ilgili termodinamik tablolarından okunur. Bu değerleri (5.6) eşitliğinde yerine koyarsak:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{kurutma} &= (2,61 \times 10^{-3}) [4,18 \times (55 - 25) + 2370,8] \\ \dot{Q}_{kurutma} &= 6,51 \text{ kW}\end{aligned}\quad (5.9)$$

sonucunu buluruz.

#### 5.2.4 Kurutucu Çıkışı Havanın Özellikleri

Kurutucu giriş havası sıcaklık ve bağıl nemi ile çıkış havasının bağıl nemi önceden verilmiştir. Buna göre giriş havası özellikleri olan:

$$\begin{aligned}T_9 &= 65^\circ\text{C} \\ \phi_9 &= \%60\end{aligned}\quad (5.10)$$

değerlerine psikrometrik tabloda karşılık gelen özgül nem ve entalpi değerlerini yazarsak:

$$\begin{aligned}\omega_9 &= 0,1082 \text{ kg su/kg kuru hava} \\ h_9 &= 368,74 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\quad (5.11)$$

olarak buluruz. Buna göre kurutucu çıkış havasının bağıl nemi:

$$\phi_1 = \%85 \quad (5.12)$$

tir. Çıkan havanın entalpisi:

$$\dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_9 + \dot{m}_{\text{buharlaşma}} h_{f,i} \quad (5.13)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Giren suyun entalpisi ihmal edilerek:

$$h_1 = h_9 = 368,74 \text{ kJ/kg} \quad (5.14)$$

yazılabilir. Buna göre yine psikrometrik tablolardan karşılık gelen değerleri okursak:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 0,1115 \text{ kg su/kg kuru hava} \\ T_1 &= 57,94 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{5.15}$$

olarak bulunur.

### 5.2.5 Üfleme Havaı Debisi

Birim kg havanın kurutucuda uzaklaştırdığı nem miktarı şu şekilde belirlenir:

$$\frac{\dot{m}_{\text{buharlaşma}}}{\dot{m}_a} = (\omega_1 - \omega_9)\tag{5.16}$$

İfadeden kuru hava kütleı debisi çekilerek kurutucu girişinde gerekli olan üfleme havaı debisi bulunur:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{\text{buharlaşma}}}{(\omega_1 - \omega_9)}\tag{5.17}$$

Eşitlikte bilinenlerin yerine yazılması durumunda:

$$\dot{m}_a = \frac{2,61 \times 10^{-3}}{(0,1115 - 0,1082)} = 0,79 \text{ kg/s}\tag{5.18}$$

olarak bulunur.

### 5.2.6 Soğutma ve Nem Alma Sonrası Havaın Özellikleri

Isı pompasının buharlaştırıcısında soğutulan ve nemi alınan kurutma havaının buharlaştırıcı çıkışındaki (5) bağıl nemi  $\phi_5 = \%95$  olarak kabul edilmiştir. Taze hava ve bypass havaının olmayacağı kabulünün de yapılmasından dolayı, kurutucu içerisinde alınan nemin tamamının ısı pompasının buharlaştırıcısından geçerken alınması gerekir. Buna göre kurutma havaının buharlaştırıcı çıkışındaki (5) özgül nem değeri, kurutucu girişinde üfleme havaının (9) özgül nem değeriyle aynı olacaktır. Buharlaştırıcı çıkışındaki (5) havaın bilinen özelliklerini yazarsak:

$$\begin{aligned}\phi_5 &= \%95 \\ \omega_5 &= \omega_9 = 0,1082 \text{ kg su/kg kuru hava}\end{aligned}\quad (5.19)$$

bu değerleri kullanarak psikrometrik tablodan:

$$\begin{aligned}T_5 &= 55,07^\circ\text{C} \\ h_5 &= 356,81 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\quad (5.20)$$

değerleri bulunur.

### 5.2.7 Ön Soğutma ve Ön Isıtma Yüğü

Havanın ön soğutmadan geçişi sırasında duyulur soğutma işlemi gerçekleştirilir. Buna göre (3.23) numaralı eşitliği ön soğutma için şu şekilde düzenleriz:

$$\dot{Q}_{\text{ön-soğutma}} = \dot{m}_a (h_3 - h_4) \quad (5.21)$$

Ön soğutma girişinde (3) havanın entalpisi kurutucu çıkışındaki (1) havanın entalpisine eşittir:

$$h_3 = h_1 = 368,74 \text{ kJ/kg} \quad (5.22)$$

Ön soğutmada yoğuşmanın olması istenmediği için ön soğutma çıkışı (4) ile kurutucu çıkışındaki (1) havanın özgül nem değeri birbirine eşittir:

$$\omega_4 = \omega_1 = 0,1115 \text{ kg su/kg kuru hava} \quad (5.23)$$

Bu noktadaki sıcaklığın bilinmesi entalpinin bulunması için yeterli olacaktır. Isı geri kazanım ünitesinin verimi  $\eta_{GK} = \%50$  olarak kabul edilmişti. Isı geri kazanım ünitesinin verimi şu şekilde yazılır:

$$\eta_{GK} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_6} \quad (5.24)$$

Burada:

$$T_6 = T_5 = 55,07^\circ\text{C} \quad (5.25)$$

olduğu için (5.24) eşitliğinden  $T_4$  terimi çekildiğinde:

$$T_4 = T_3 - \eta_{GK} (T_3 - T_6) \quad (5.26)$$

eşitliği elde edilir. Buna göre  $T_4$  :

$$T_4 = 57,94 - 0,5(57,94 - 55,07) = 56,51^\circ\text{C} \quad (5.27)$$

olarak bulunur. Bu sıcaklık ve nemdeki havanın özellikleri psikrometrik tablodan okunursa entalpi ve bağıl nem değerleri bulunur:

$$\begin{aligned} h_4 &= 367,13 \text{ kJ/kg} \\ \phi_4 &= \%90,97 \end{aligned} \quad (5.28)$$

Bulunan değerleri (5.21) numaralı eşitlikte yerine koyarsak:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{ön-soğutma}} &= 0,79(368,74 - 367,13) \\ \dot{Q}_{\text{ön-soğutma}} &= 1,27 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.29)$$

değeri bulunur. Ön soğutma yükü ile ön ısıtma yükü aynı olacağından, *geri kazanım yükü* olarak ifade edilip:

$$\dot{Q}_{GK} = \dot{Q}_{\text{ön-ısıtma}} = \dot{Q}_{\text{ön-soğutma}} = 1,27 \text{ kW} \quad (5.30)$$

olarak yazılır.

### 5.2.8 Buharlaştırıcı Yükü

Buharlaştırıcıda soğutma ve nem alma işlemi gerçekleşir. Buna göre enerji korunumunu gösteren (3.27) numaralı eşitlik mevcut sistem için düzenlenirse:

$$\dot{Q}_{\text{buharlaştırıcı}} = \dot{m}_a (h_4 - h_5) - \dot{m}_{\text{yoğuşma}} h_{\text{yoğuşma}} \quad (5.31)$$

denklemini elde edilir. Burada:

$$\dot{m}_{yoğuşma} = \dot{m}_{buharlaştırma} = 2,61 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (5.32)$$

dir.  $h_{su}$  ise  $T_5$  sıcaklığındaki doymuş sıvının entalpisi olduğuna göre:

$$h_{yoğuşma} = h_{f-55,07^\circ\text{C}} = 230,49 \text{ kJ/kg} \quad (5.33)$$

değeri bulunur. Böylece numaralı (5.31) eşitliğin sonucu:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{buharlaştırıcı} &= 0,79(367,13 - 356,81) - (2,61 \times 10^{-3}) \times 230,49 \\ \dot{Q}_{buharlaştırıcı} &= 7,55 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.34)$$

olarak bulunur.

### 5.2.9 Kompresör Kapasitesi

Buharlaştırıcı yükünün bulunmasıyla sistemde kullanılacak kompresör seçimi yapılabilir. Bunun için ısı pompasının etkinlik katsayısı değerinden faydalanılır. Buna göre (4.2) eşitliği kullanılarak:

$$\dot{W}_{kompresör} = \dot{W}_g = \frac{\dot{Q}_L}{\text{COP}_{\text{IP}} - 1} = \frac{\dot{Q}_{buharlaştırıcı}}{\text{COP}_{\text{IP}} - 1} \quad (5.35)$$

yazılır. Uygulamalar göz önüne alınarak ısı pompasının etkinlik katsayısını  $\text{COP}_{\text{IP}} = 3$  olarak kabul edilebilir. Böylece kompresör gücü:

$$W_{kompresör,\text{max}} = \frac{7,55}{(3-1)} = 3,78 \text{ kW} \quad (5.36)$$

olarak hesaplanır.



### 5.2.10 Hesapların Tekrarlanması

Sistemden dışarıya ısı atılmaması halinde, kompresörde verilen işten dolayı dolaşım havası enerjisi ve sıcaklığı sürekli artacaktır. Sistemden atılması gereken ısı miktarı

$$\dot{Q} = \dot{W}_{komp} + \dot{m}_{buharlaşma} (h_{f,T_i} - h_{f,T_5}) \quad (5.37)$$

olur. Bu değeri dengelemek için bir miktar yüksek nemli hava egzoz edilmekte ve yerine aynı miktarda taze hava alınmaktadır. Burada:

$$h_{f,T_i} \approx h_{f,T_5} \quad (5.38)$$

kabul edilerek, hesaplanan kompresör gücüne bağlı olarak egzoz havasının debisi bulunur:

$$\dot{m}_{a, egzoz} = \dot{m}_{a, taze} = \frac{W_{kompresör}}{h_{egzoz} - h_{taze}} = \frac{W_{kompresör}}{h_1 - h_0} \quad (5.39)$$

Bu denklemdeki dış ortamdaki havaya ait entalpi değeri tasarımda belirlenen diğer özelliklerine göre bulunabilir:

$$\begin{aligned} T_{taze} &= T_0 = 25^\circ\text{C} \\ \phi_{taze} &= \phi_0 = \%50 \end{aligned} \quad (5.40)$$

değerlerine karşılık gelen entalpi ve özgül nem değerleri psikrometrik tablodan okunursa:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 0,009879 \text{ kg su/kg kuru hava} \\ h_0 &= 70,33 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (5.41)$$

değerleri elde edilir. (5.39) eşitliğinde değerlerin yerine konması durumunda:

$$\dot{m}_{a, egzoz} = \frac{3,78}{(368,74 - 70,33)} = 1,27 \times 10^{-2} \text{ kg/s} \quad (5.42)$$

sonucuna ulaşılır. Ön soğutucu ve buharlaştırıcı üzerinden geçen kuru hava miktarı:

$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a - \dot{m}_{a,egzoz} = 0,79 - 1,27 \times 10^{-2} = 0,777 \text{ kg/s} \quad (5.43)$$

olarak hesaplanır.

Egzoz havasından atılan yüksek nemli hava ile sistemdeki su buharının da bir kısmı dışarı atılmaktadır. Taze hava girişiyle de sisteme bir miktar su buharı dahil olur. Hava giriş çıkışları suretiyle sistemdeki su buharı kütleindeki değişim şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{m}_{v,kayıp} = \dot{m}_{a,egzoz} (\omega_{egzoz} - \omega_{taze}) = \dot{m}_{a,egzoz} (\omega_1 - \omega_0) \quad (5.44)$$

Bu durumda su buharı kütleindeki değişim:

$$\dot{m}_{v,kayıp} = 1,27 \times 10^{-2} (0,1115 - 0,009879) = 1,29 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (5.45)$$

olarak hesaplanır. Isı pompasının buharlaştırıcısında yoğuşacak su miktarı ise:

$$\dot{m}_{yoğuşma} = \dot{m}_{buharlaşma} - \dot{m}_{v,kayıp} \quad (5.46)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir ve değerlerin yerine yazılmasıyla:

$$\dot{m}_{yoğuşma} = 2,61 \times 10^{-3} - 1,29 \times 10^{-3} = 1,32 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (5.47)$$

olarak bulunur.

Buharlaştırıcıdan çıkan hava (5) taze hava (0) ile karışarak ön ısıtma girişindeki karışım havası (6) elde edilir. Adyabatik olduğu kabul edilen karışım için (3.31) denklemini kullanılarak:

$$\frac{\dot{m}_{a,taze}}{\dot{m}_{a,5}} = \frac{\omega_5 - \omega_6}{\omega_6 - \omega_0} = \frac{h_5 - h_6}{h_6 - h_0} \quad (5.48)$$

yazılır.  $\omega_5$  değeri yalnız bırakılacak şekilde düzenlenirse:

$$\omega_5 = \omega_6 + \frac{\dot{m}_{a,taze} (\omega_6 - \omega_0)}{\dot{m}_{a,5}} \quad (5.49)$$

elde edilir. Değerler yerine yazılırsa:

$$\omega_5 = 0,1082 + \frac{1,27 \times 10^{-2} (0,1082 - 0,009879)}{0,777} = 0,1098 \text{ kg su/kg kuru hava} \quad (5.50)$$

sonucu bulunur. Böylece:

$$\begin{aligned} \phi_5 &= \%95 \\ \omega_5 &= 0,1098 \text{ kg su/kg kuru hava} \end{aligned} \quad (5.51)$$

değerleri için entalpi ve kuru termometre sıcaklık değerleri psikrometrik tablodan okunur:

$$\begin{aligned} h_5 &= 361,29 \text{ kJ/kg} \\ T_5 &= 55,33^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (5.52)$$

Karışım havasının (6) entalpisi için (5.48) eşitliği düzenlenerek:

$$h_6 = \frac{\dot{m}_{a,5} h_5 + \dot{m}_{a,taze} h_0}{\dot{m}_{a,taze} + \dot{m}_{a,5}} \quad (5.53)$$

yazılır ve değerler yerine konulduğunda:

$$h_6 = \frac{(0,777 \times 361,29) + (1,27 \times 10^{-2} \times 70,33)}{(1,27 \times 10^{-2} + 0,777)} = 356,61 \text{ kJ/kg} \quad (5.54)$$

olarak bulunur. Karışım havasının (6) özellikleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \omega_6 &= 0,1082 \text{ kg su/kg kuru hava} \\ h_6 &= 356,61 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (5.55)$$

Psikrometrik diyagramdan bu değerlere karşılık gelen bağıl nem ve sıcaklık değerleri sırasıyla:

$$\begin{aligned}\phi_6 &= \%94,74 \\ T_6 &= 54,9^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (5.56)$$

olarak okunur. Isı geri kazanım ünitesinin verimliliği kullanılarak buharlaştırıcı girişi (4) hava özellikleri hesaplanır. (5.26) eşitliği kullanılarak:

$$T_4 = 57,94 - 0,5(57,94 - 54,9) = 56,42^\circ\text{C}\quad (5.57)$$

değeri elde edilir. Buharlaştırıcı girişi (4) hava bilinen özellikleri:

$$\begin{aligned}\omega_4 &= 0,1115 \text{ kg su/kg kuru hava} \\ T_4 &= 56,42^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (5.58)$$

olup karşılık gelen değerler:

$$\begin{aligned}h_4 &= 367,02 \text{ kJ/kg} \\ \phi_4 &= \%91,36\end{aligned}\quad (5.59)$$

olarak bulunur. Bu durumda geri kazanım yükü (5.21) numaralı eşitlikten:

$$\dot{Q}_{GK} = 0,777(368,74 - 367,02) = 1,34 \text{ kW}\quad (5.60)$$

olarak hesaplanır. Isı pompasının buharlaştırıcısında yoğuşan nemin  $T_5$  sıcaklığındaki entalpisi:

$$h_{f-55,33^\circ\text{C}} = 231,56 \text{ kJ/kg}\quad (5.61)$$

olarak ilgili termodinamik tablolarından elde edilir. Bu durumda buharlaştırıcı yükü (5.31) eşitliğinden hesaplanırsa:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{buharlaştırıcı}} &= 0,777(367,02 - 361,29) - (1,32 \times 10^{-3} \times 231,56) \\ \dot{Q}_{\text{buharlaştırıcı}} &= 4,15 \text{ kW}\end{aligned}\quad (5.62)$$

değeri bulunur. Bu durumda kompresör yükünün yeni değeri:

$$\dot{W}_{kompresör} = \frac{4,15}{(3-1)} = 2,075 \text{ kW} \quad (5.63)$$

ve yoğuşturucu yükünün yeni değeri de:

$$\dot{Q}_{yoğuşturucu} = \dot{Q}_{buharlaştırıcı} + \dot{W}_{kompresör} \quad (5.64)$$

olmak üzere

$$\dot{Q}_{yoğuşturucu} = 4,15 + 2,075 = 6,225 \text{ kW} \quad (5.65)$$

olarak bulunur.

Elde edilen değerler hesapların ilk tekrarı sonucunda elde edilen birinci iterasyon değerleridir. Bulunan yeni kompresör değerine göre tekrardan iterasyon yapılması suretiyle, elde edilen yeni değerler kararlı bir duruma gelinceye kadar iterasyonlar devam ettirilmiştir. Her iterasyon sonucunda:

$$\text{KYDY} = \frac{|W_{kompresör,i} - W_{kompresör,i-1}|}{W_{kompresör,i-1}} \times 100 \quad (5.66)$$

bağıntısıyla ifade edilmiş olan *kompresör yükü değişim yüzdesi* değeri hesaplanmıştır. Yeni bulunan kompresör yükünün bir önceki iterasyonda bulunan yüke göre değişim miktarını gösteren bu ifadenin sonucu, kabul edilebilir bir değere kadar azaldığında hesaplar sonlandırılmıştır. Yapılan ilk iterasyon sonucunda kompresör yükü değişim yüzdesi şu şekilde bulunmuştur:

$$\text{KYDY} = \frac{3,78 - 2,075}{3,78} \times 100 = \%45,1 \quad (5.67)$$

Bu çalışmada toplam 5 adet iterasyon yapılmış, sonuç olarak %0,19 değerinde kompresör yükü değişim yüzdesi elde edilmiştir. İterasyonlarda hesaplanan değerler Tablo 5.2'de verilmiş olup, elde edilen yük değerlerine ait her bir adımdaki değişim Şekil 5.2'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

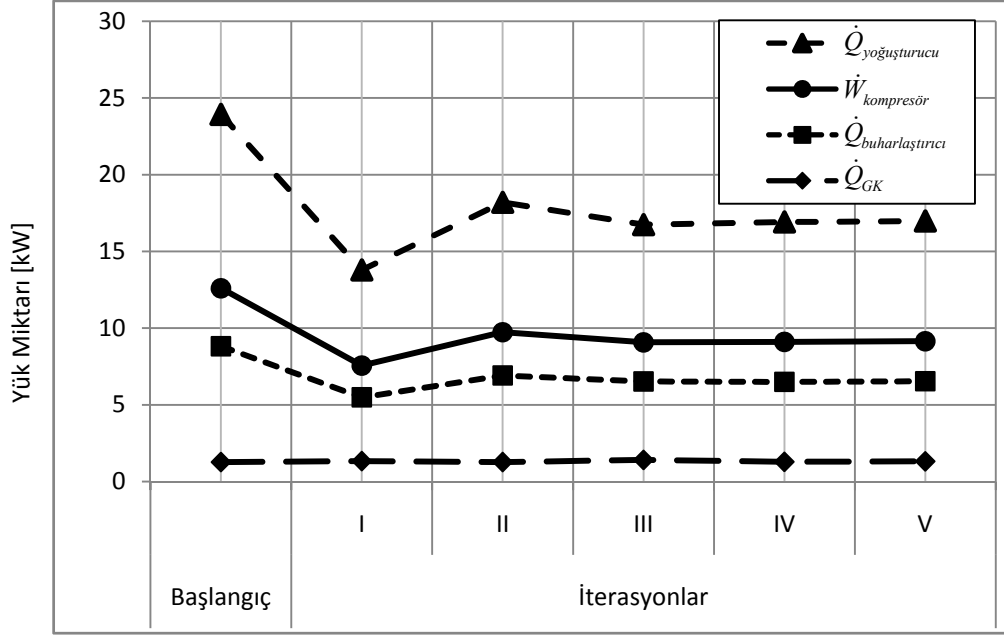
Bulunan son kompresör değerine göre kurutucunun SMER değeri (4.5) numaralı eşitlik kullanılarak:

$$SMER = \left( \frac{93,82}{2,61 \times 10} \right) = 3,59 \text{ kg/kWh} \quad (5.68)$$

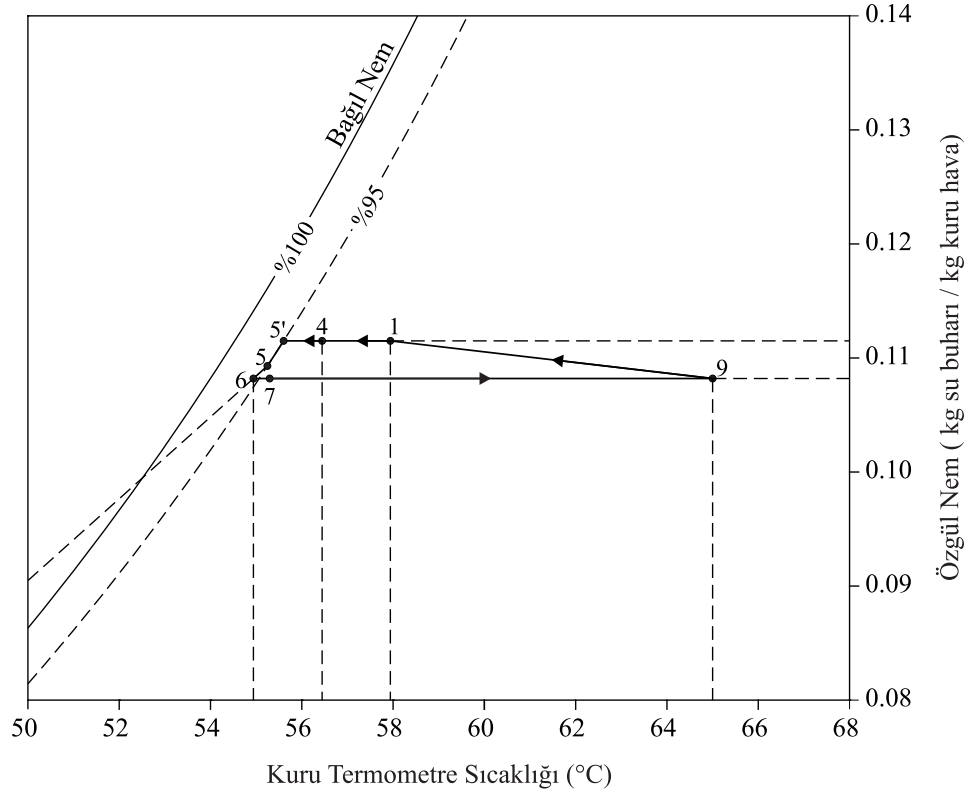
bulunmuştur.

Tablo 5.2 Hesaplanan her bir iterasyonda bulunan değerler

	Değişken	Başlangıç	İterasyonlar				
			I	II	III	IV	V
Debiler	$\dot{m}_{a, \text{egzoz}}$ [kg/s]	0	$1,27 \times 10^{-2}$	$6,95 \times 10^{-3}$	$9,45 \times 10^{-3}$	$8,56 \times 10^{-3}$	$8,75 \times 10^{-3}$
	$\dot{m}_{a,2}$ [kg/s]	0,79	0,777	0,783	0,781	0,781	0,781
	$\dot{m}_{v, \text{kayıp}}$ [kg/s]	0	$1,29 \times 10^{-3}$	$7,06 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$8,7 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-4}$
	$\dot{m}_{\text{yoğuşma}}$ [kg/s]	$2,61 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-3}$	$1,74 \times 10^{-3}$	$1,72 \times 10^{-3}$
(5) Durumu	$\omega_5$	0,1082	0,1098	0,1091	0,1093	0,1093	0,1093
	$h_5$ [kJ/kg]	356,81	361,29	359,33	359,89	359,89	359,89
	$T_5$ [°C]	55,07	55,33	55,21	55,245	55,245	55,245
(6) Durumu	$h_6$ [kJ/kg]	356,81	356,62	356,79	356,43	356,75	356,68
	$T_6$ [°C]	55,07	54,90	55,05	54,745	55,01	54,95
	$\phi_6$ [%]	95	95,74	95,09	96,47	95,24	95,51
(4) Durumu	$h_4$ [kJ/kg]	367,13	367,02	367,11	366,93	367,09	367,05
	$T_4$ [°C]	56,51	56,42	56,495	56,34	56,475	56,445
	$\phi_4$ [%]	90,97	91,36	91,04	91,71	91,71	91,255
Yükler	$\dot{Q}_{GK}$ [kW]	1,27	1,34	1,28	1,41	1,29	1,32
	$\dot{Q}_{\text{buharlaştırıcı}}$ [kW]	7,55	4,15	5,64	5,11	5,21	5,22
	$\dot{W}_{\text{kompresör}}$ [kW]	3,780	2,075	2,820	2,555	2,605	2,610
	$\dot{Q}_{\text{yoğuşturucu}}$ [kW]	11,33	6,23	8,46	7,67	7,82	7,83
	KYDY [%]	-	45,11	35,90	9,40	1,96	0,19



Şekil 5.2 İterasyon sonuçlarındaki yük değerlerinin grafiksel gösterimi



Şekil 5.3 Dolaşım havasının psikrometrik özelliklerinin değişimi

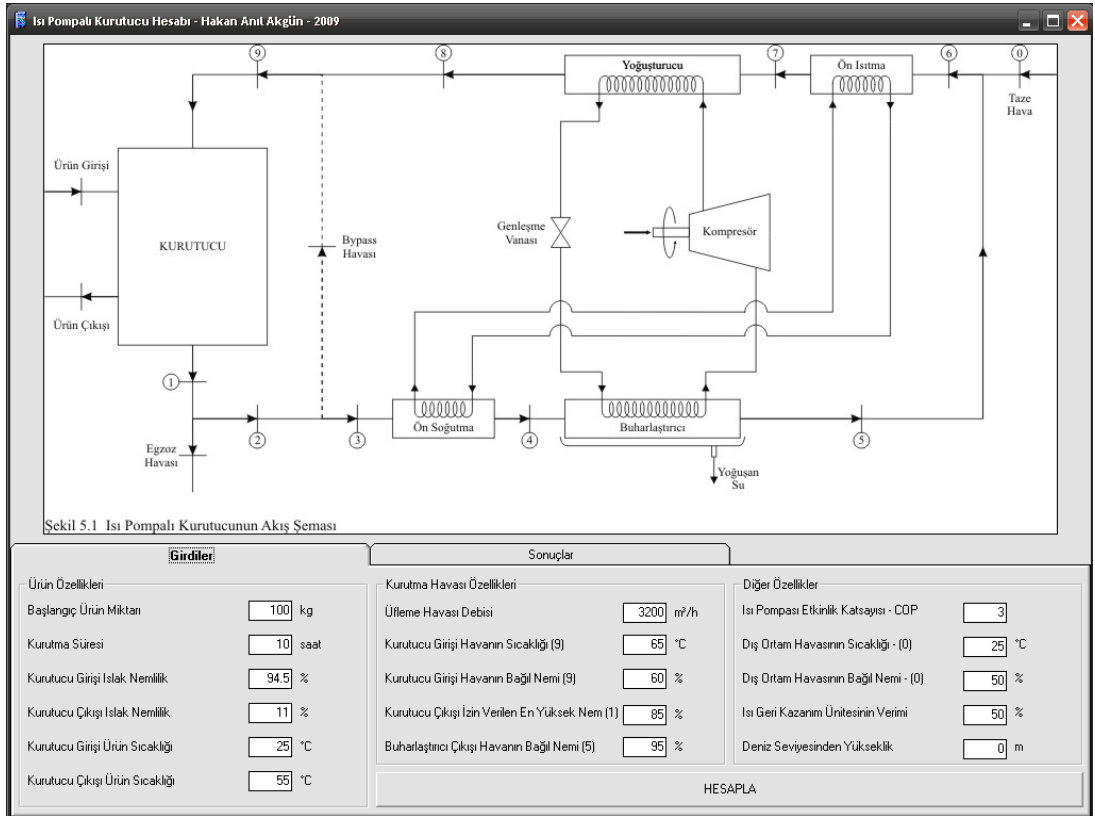
## BÖLÜM ALTI

### BİLGİSAYAR YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Günümüzde mühendislik problemlerinin çözümlenmesinde kullanılmak üzere farklı bilgisayar yazılımları geliştirilmektedir. Bu yazılımlar sayesinde, sistemlerin tasarım sürecinde harcanan zamanın azalmasının yanında, yapılan hesaplamaların hassasiyeti artmaktadır.

Bu amaçla, tasarlanan sistem için bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ile farklı girdi değerleri için hesaplar tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yazılıma ait kodlamalar Ek-2’de verilmiştir.

#### 6.1 Bilgisayar Yazılımı



Şekil 6.1 Geliştirilen yazılımın genel görünümü



Yazılım, Visual Basic 6.0 ortamında geliştirilmiştir. Yazılıma ilişkin ekran görüntüsü Şekil 6.1 de verilmiştir.

Yazılımın arayüzünde “Girdiler” ve “Sonuçlar” olmak üzere iki ayrı sekme bulunmaktadır. “Girdiler” sekmesi içinde, Bölüm 5.1.1 de kabulleri yapılan değerler değiştirilebilmektedir. Bu değerlere ek olarak, hesaplamalara sistemin deniz seviyesinden olan yüksekliği de eklenmiştir. Ayrıca üfleme havası debisi girdi değeri haline dönüştürülmüştür.

“Sonuçlar” sekmesi sekmesi altında ise sistemin bileşenlerine ait enerji yükleri ile numaralandırılmış her bir noktadaki havanın psikrometrik özellikleri hesaplanmaktadır. Şekil 6.2 de yazılım ile elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Girdiler		Sonuçlar		Sonuçlar				
Sonuçlar				Sıcaklık - (°C)	Entalpi - (kJ/kg)	Özgül Nem - (kg/kg)	Bağıl Nem - (%)	
Buharlaştırılacak Nem Miktarı	93.82 kg	Yoğuşan Su Debisi	0.001784 kg/s	0	25	50.32	0.0099	50
Kuruma Hızı - MER	9.382 kg/h	Kompresör Yükü	2.75 kW	1	58.16	349.6	0.1116	84.18
Buharlaştırma Debisi	0.002606 kg/s	Buharlaştırıcı Yükü	5.5 kW	2	58.16	349.6	0.1116	84.18
Gerekli Isıl Güç	6.5 kW	Yoğuşturucu Yükü	8.24 kW	3	58.16	349.6	0.1116	84.18
Üfleme Havası Debisi	0.79 kg/s	Isı Geri Kazanım Ünitesi Yükü	1.51 kW	4	56.57	347.67	0.1116	90.75
Egzoz / Taze Hava Debisi	0.00808 kg/s	SMER	3.41 kg/kWh	5	55.24	340.11	0.1093	95
				6	54.98	337.15	0.1083	95.44
				7	56.56	339.06	0.1083	88.5
				8	65	349.25	0.1083	60
				9	65	349.25	0.1083	60

Şekil 6.2 Yazılımın ile elde edilen sonuçlar

## 6.2 Yazılımın Geliştirilmesinde Kullanılan Eşitlikler

Yazılımın geliştirilmesinde Bölüm 5’te kullanılan hesaplamalar kullanılmıştır. Doğruluğu artırma amacıyla ihmal edilen birtakım değerler hesaplamalara eklenmiştir. Hesaplamaların bir kısmı klasik yöntemler ile yapılırken, bir kısmı için sayısal yöntemlerden faydalanılmıştır.

Bu kısımda, yazılımda kullanılan ve ilgili tablolardan okunarak çalışmada kullanılmış olan değerlerin sayısal olarak hesaplanmasına ilişkin eşitlik ve yöntemler verilmiştir.

### 6.2.1 Deniz Seviyesinden Yükseklik

Deniz seviyesinden yüksekliğin değişmesiyle açık hava basıncında değişiklik görülür. Buna bağlı olarak havanın diğer psikrometrik değerleri de değişir. Açık hava basıncının yüksekliğe göre değişimi:

$$P_{atm} = 101,325 \left(1 - 2,25577 \times 10^{-5} Z\right)^{5,2559} \quad (6.1)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

### 6.2.2 Üfleme Havası Debisi

Üfleme havası debisi değeri hacimsel debi olarak  $m^3/h$  cinsinden bir girdi değeri haline getirilmiştir. Buna göre kuru hava debisi değeri  $kg/s$  olarak:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a \rho}{3600} \quad (6.2)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada yoğunluk:

$$\rho = \frac{P_{atm} - P_{buhar}}{0,287 \times T} \quad (6.3)$$

ile bulunur.

### 6.2.3 Egzoz Havası Debisi

Egzoz havası debisi hesaplanırken kurutucuda sisteme giren suyun entalpisi ile buharlaştırıcıdan atılan yoğuşmuş olan suyun entalpisi arasındaki fark ihmal edilmişti. Yazılımda, yapılan bu kabul ortadan kaldırılarak egzoz havası debisinin değeri:

$$\dot{m}_{a, egzoz} = \dot{m}_{a, taze} = \frac{W_{kompresör} + \dot{m}_{buharlaştırma} (h_{f, T_1} - h_{f, T_5})}{h_1 - h_0} \quad (6.4)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır.

#### 6.2.4 Kurutucu Çıkışı Havanın Entalpisi

Buharlaştırılan suyun entalpisi de hesaba eklenerek,  $h_1 = h_9$  kabulü kaldırılmış ve  $h_1$  değeri (5.13) eşitliğinin düzenlenerek:

$$h_1 = \frac{\dot{m}_a h_9 + \dot{m}_{\text{buharlaşıma}} h_{f,i}}{\dot{m}_a} \quad (6.5)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

#### 6.2.5 Su Buharının Doyma Basıncı

ASHRAE Handbook – Fundamentals (2009)'dan edinilen eşitliğe göre suyun buharının belirli bir sıcaklıktaki doyma basıncı:

$$\ln P_{su} = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T \quad (6.6)$$

ile hesaplanmaktadır. Buradaki sabitler:

$$\begin{aligned} C_8 &= -5,8002206 \times 10^3 \\ C_9 &= 1,3914993 \\ C_{10} &= -4,8640239 \times 10^{-2} \\ C_{11} &= 4,1764768 \times 10^{-5} \\ C_{12} &= -1,4452093 \times 10^{-8} \\ C_{13} &= 6,5459673 \end{aligned} \quad (6.7)$$

şeklindedir.

#### 6.2.6 Doymuş Suyun Entalpisi

Belirli bir sıcaklıktaki doymuş suyun entalpisi:

$$h_{f,T} = 4,186 \times T \quad (6.8)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

### 6.2.7 Havanın Entalpisi

Belirli bir sıcaklıkta ve özgül nemdeki havanın entalpisinin hesaplanması:

$$h = 1,006T + \omega(2501 + 1,86T) \quad (6.9)$$

eşitliği kullanılarak gerçekleştirilir.

### 6.2.8 Farklı Noktaların Psikrometrik Özelliklerinin Hesaplanması

Dolaşım havasının, numaralandırılan durumlardaki psikrometrik özelliklerinin hesaplanmasında izlenen yöntemler maddeler halinde belirtilmiştir.

- Üfleme havası (9) ve taze hava (0) için
  - Bilinenler: Kuru termometre sıcaklığı, bağıl nemi, basıncı
  - İstenenler: Özgül Nemi, entalpisi
    - Özgül nem
      - (6.6) ile su buharının doyma basıncı
      - (3.8) ile havanın özgül nemi
    - Entalpi
      - (6.9) ile havanın entalpisi
- Kurutucu çıkış havası (1) için
  - Bilinenler: Entalpisi
  - İstenenler: özgül nemi, kuru termometre sıcaklığı, bağıl nemi
    - Özgül nemi
      - (5.16) eşitliğinden özgül nem değerinin çekilmesi ile
    - Kuru termometre sıcaklığı
      - (6.9) eşitliğinden kuru termometre sıcaklığı değerinin çekilmesi ile

- Bağlı Nem
  - (6.6) ile doyma buhar basıncı
  - (3.11) ile bağlı nemi
- Buharlaştırıcı çıkış havası (5) için
  - Bilinenler: Özgül nemi, bağlı nemi
  - İstenenler: Kuru termometre sıcaklığı, entalpisi
    - Kuru termometre sıcaklığı
      - (3.11) eşitliğinden doyma buhar basıncının çekilmesi ile
      - (6.6) eşitliğinden Düzeltmiş Sekant yöntemi yardımıyla kuru termometre sıcaklığının bulunması ile
    - Entalpisi
      - (6.9) ile entalpisi
- Ön soğutma çıkış havası (4) için
  - Bilinenler: Kuru termometre sıcaklığı, özgül nemi
  - İstenenler: Bağlı nemi, entalpisi
    - Bağlı Nemi
      - (6.6) ile doyma buhar basıncı
      - (3.11) ile bağlı nemi
    - Entalpisi
      - (6.9) ile entalpisi
- Ön ısıtma giriş havası (6) ve çıkış havası (7) için
  - Bilinenler: Özgül nemi, entalpisi
  - İstenenler: Kuru termometre sıcaklığı, bağlı nemi
    - Kuru termometre sıcaklığı
      - (6.9) eşitliğinden kuru termometre sıcaklığı değerinin çekilmesi ile
    - Bağlı Nemi
      - (6.6) ile doyma buhar basıncı
      - (3.11) ile bağlı nemi

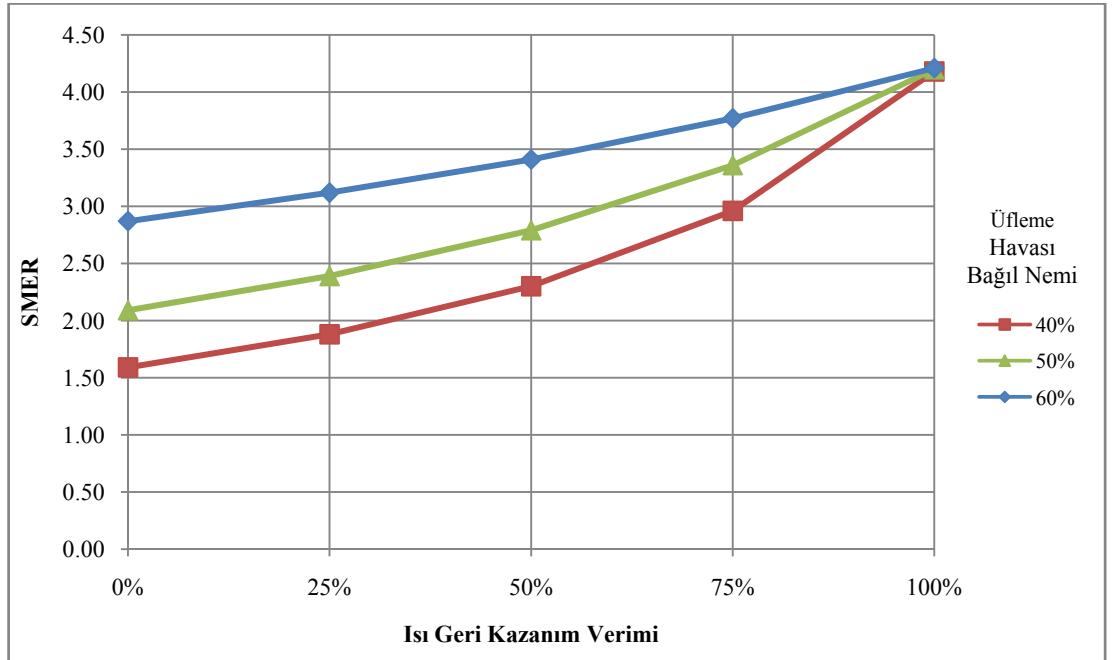
## BÖLÜM YEDİ

### SAYISAL SONUÇLAR

#### 7.1 Yazılımdan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Geliştirilen yazılım farklı koşullar için çalıştırılarak hesaplamalar tekrarlanmıştır. Elde edilen değerlerin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

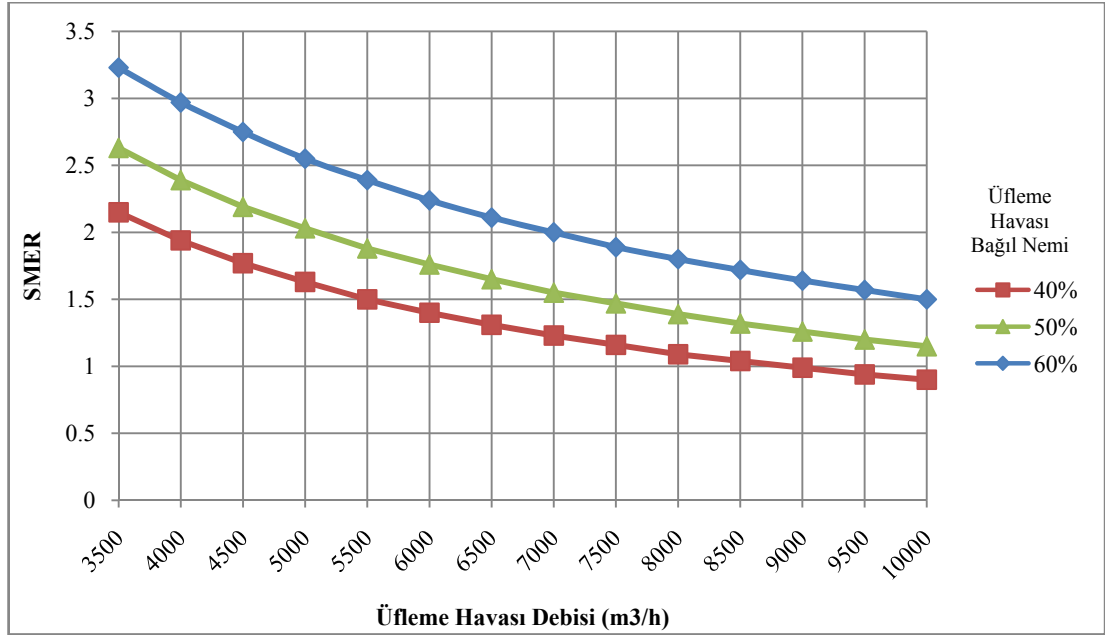
Isı geri kazanım ünitesi veriminin ve üfleme havası bağıl neminin farklı değerleri için SMER değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Şekil 7.1'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.1 SMER değerinin ısı geri kazanım ünitesi verimine göre değişimi

Isı geri kazanım veriminin artması ile sistemin SMER değerindeki artış görülmüştür. Isı geri kazanım veriminin artmasıyla birlikte, dolaşım havasının buharlaştırıcı girişindeki bağıl nemi de artar. Bağıl nemi ve doymaya yaklaşan havanın soğutulması için gereken enerji miktarı düşer ve buharlaştırıcı yükü azalır. Sonuç olarak kompresör yükü de azalarak SMER değeri artar.

Şekil 7.2’de SMER değerinin kurutucu girişindeki hava debisine göre değişimi gösterilmiştir. Hava debisinin artması ile SMER değeri azalmaktadır. Hava debisinin artması kurutucu çıkışı bağıl nemini düşmekte ve buharlaştırıcıda havanın soğutulması ve neminin alınması için gerekli güç artmaktadır. Dolayısıyla kompresör kapasitesinde de artış gerçekleşirken ve SMER değeri önemli miktarda azalmaktadır.



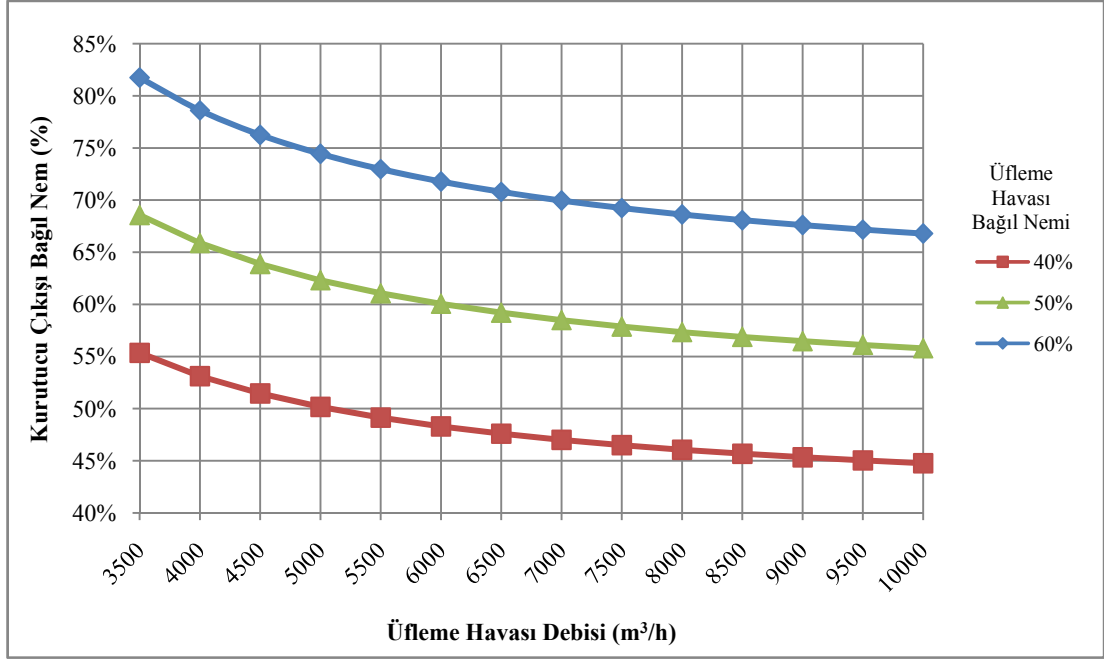
Şekil 7.2 SMER değerinin üfleme havası debisine göre değişimi

Üfleme havasının debisine bağlı olarak kurutucu çıkışındaki bağıl nemin değişimi Şekil 7.3’te verilmiştir. Kuruma hızının sabit olması dolayısıyla, debinin artması halinde, aynı miktar nemi uzaklaştırmak için daha fazla hava kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak da çıkıştaki bağıl nem düşmektedir.

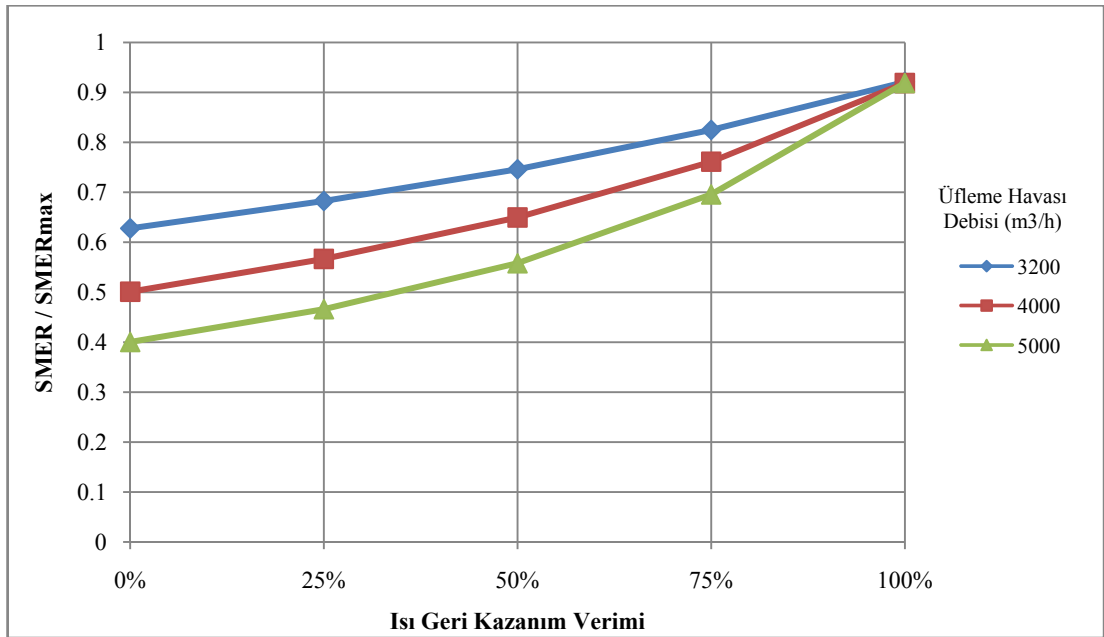
Şekil 7.4’te ısı geri kazanım veriminin değişimi ile SMER değerinin olabilecek en yüksek değerine oranı gösterilmiştir. SMER’in alabileceği en yüksek değer:

$$SMER_{\max} = \frac{COP_{IP} \times 3600}{h_{fg, T_1}} \quad (7.1)$$

şeklinde tanımlanabilir.



Şekil 7.3 Kurutucu çıkış havası bağıl neminin üfleme havası debisine göre değişimi



Şekil 7.4 SMER/SMER<sub>max</sub> değerinin ısı geri kazanım verimine göre değişimi

Isı geri kazanım verimi arttıkça SMER değerlerinin alabileceği en yüksek değere yaklaştığı görülmektedir. Bunun nedeni dolaşım havasının duyulur ısı yükünün ünitesinde karşılanmasıdır. Buharlaştırıcı esas olarak nemin yoğunlaştırılması için gerekli yükü karşılamaktadır. Bu şekilde sisteme verilmesi gereken enerji sadece buharlaşma gizli ısı için gereken enerji olmaktadır.



Egzoz havası sıcaklığının çevre sıcaklığından ve ürün başlangıç sıcaklığından bir miktar yüksek olması nedeniyle, SMER değeri sadece buharlaşma gizli ısısı yükü esas alınarak hesaplanmış olan  $SMER_{max}$  değerine ulaşamamaktadır.

## BÖLÜM SEKİZ

### SONUÇLAR

Bu çalışmada ısı pompalı kurutucuların performans değerleri sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde çalışılan ısı pompalı kurutuculardan farklı olarak ısı geri kazanım ünitesi sisteme dahil edilmiştir. Sistem, kapalı sistem kurutma devresi olarak tasarlanmıştır. Devrede, sabit hızlı kuruma periyodu esas alınarak, kurutucu girişi hava debisi, başlangıç nemi ve ısı geri kazanım veriminin değişimlerinin enerji performansına etkisi araştırılmıştır.

Kurutulacak ürünün nem ve sıcaklıkla kuruma davranışının değişmesi esas belirleyici etken olup, burada ürünün ideal koşullarda davrandığı ve kuruma hızının sabit kaldığı duruma göre hesaplamalar yapılmıştır.

Kurutucu sistemine sıcaklık ve nemin kontrol edilmesi amacıyla egzoz ve taze hava giriş çıkışları eklenmiştir. Bu şekilde kurutucu girişindeki kurutma havasının özelliklerinin sabit tutulabilmesi sağlanmıştır.

Çalışmada 100 kg ürünü 10 saatte kurutacak bir ısı pompalı kurutucu sistemi tasarlanmıştır. Ürünün ilk ve son ıslak nemlilikleri, içerisinde yüksek miktarda nem barındıran domatesin kurutulması ile ilgili literatürdeki çalışmalardan elde edilen nemlilik değerleri alınarak sırasıyla %94,5 ve %11 olarak alınmıştır.

Mevcut uygulamalardan edinilen deneyimler sonucunda sistemin çeşitli noktalarındaki hava sıcaklık ve bağıl nem değerleri tanımlanmıştır. Kurutucu girişinde havanın sıcaklığı 65°C ve bağıl nemi %60'tır. Kurutucu çıkışında havanın özgül nemi %85 ile sınırlanarak, kurutma odasında olası yoğuşmaların önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Sistemdeki yüklerin hesaplanmasında esnasında, enerji verimliliğinin yüksek olması istenmesinden dolayı, ısı pompası etkinlik katsayısı  $COP_{IP} = 3$  olmak üzere

sabit bir değer alınmıştır. Bu şekildeki yaklaşım, hesaplamalarda iteratif yöntemlerin kullanılmasının gerekli olduğunu göstermiş ve hesaplamalar bu şekilde yapılmıştır.

Kurutucuda üründen toplamda 93,82 kg nem uzaklaştırılmaktadır ve nemin buharlaştırılması için gerekli ısıl güç 6,51 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde dolaşan kuru hava debisi, kurutucuda alınacak nem miktarına göre hesaplanmış ve 0,78 kg/s olarak bulunmuştur.

Sistemden  $8,75 \times 10^{-3}$  kg/s kuru hava egzoz edilmekte ve aynı miktarda taze hava alınmaktadır. Bulunan egzoz değeri oldukça düşük olarak görünse de, sistemden önemli miktarda nem miktarı dışarı atılmaktadır. Bunun sonucunda ısı pompasının buharlaştırıcı yükü de yüksek oranda azalmaktadır.

Hesaplanan kompresör yükü 2,61 kW'tır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu yükleri sırasıyla 5,22 kW ve 7,83 kW olarak bulunmuştur. Isı geri kazanım ünitesinin yükü ise 1,32 kW olarak hesaplanmıştır.

Kurutma sisteminin SMER değeri 3,59 kg/kWh olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer oldukça tatmin edicidir ve sistem tasarımının uygulamaya yönelik değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Yapılan hesaplamalarda MER değeri 9,382 kg/h olarak bulunmuştur. Ancak elde edilen MER değeri sabit hızı kuruma kabul ile çalışılan değerler sonunda elde edilmiştir. Ürünün karakteristik kuruma özelliklerine ve kuruma eğrilerine göre farklılık gösterecektir.

Yapılan hesaplamalar için bir bilgisayar programın geliştirilmiştir. Farklı girdi değerlerinde göre sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Farklı fleme havası debileri için yapılan karşılaştırmada, debinin artması ile performansın düştüğü görülürken, üfleme havasının bağıl neminin artması ile performansın da yükseldiği grlmştir.

Isı geri kazanım veriminin artması ile kompresör yükünün azaldığı ve SMER değerinin arttığı görülmüştür. Bu durumda SMER değerinin teorik olarak olabileceği en yüksek değere yaklaştığı ve kurutma yükünün sadece gizli ısı yüküne ulaştığı anlaşılmıştır. Isı geri kazanım ünitesi kullanılmadığı zaman ise, buharlaştırıcı yükünün önemli bir miktarı havanın duyulur ısı değişimleri için harcanmaktadır. Sonuç olarak, pratik uygulamalarda 1 civarında olan SMER değerinin, ideal koşullarda 4 veya daha yüksek değere ulaşması mümkün görülmektedir. Kompresör yükünü hafifletmek amacıyla eklenen ısı geri kazanım sisteminin, yapılan hesaplamalar doğrultusunda yüksek miktarda yarar sağladığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Akanbi, C. T., Adeyemi R. S. ve Ojo A. (2006). Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 157–163.
- Çengel Y. A. ve Turner Y. H. (2005). *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences* (2nd ed.). NY; Mc-Graw Hill.
- Çengel Y. A. ve Boles M. A. (2002). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik* (4. baskı) (T. Derbentli, Çev) İstanbul: Literatür. (1996).
- Demirci M. (2004). *Psikrometri Nemli Havanın Termodinamiği*. İzmir; TMMOB Makine Mühendisleri Odası
- Doymaz, İ. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78, 1291–1297.
- Ertekin, C. (2002). Bazı Sebze Ve Meyvelerin Kurutulması. *Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı, 1*, 33-57.
- Geankopolis, C. J. (1983). *Transport Processes and Unit Operations* (2nd ed.). Massachusetts; Allyn and Bacon.
- Güngör, A. ve Özbalta, N., (1997). Endüstriyel Kurutma Sistemleri. *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 203(2), 737-747.
- Mujumdar, A. S. (Ed). (2007). *Handbook of Industrial Drying* (3rd ed.). FL; CRC Press.
- Özbalta N. Ve Güngör A. (2000). Kurutma Sistemlerinde Isı Pompası Kullanım Potansiyeli. *III. GAP Mühendislik Kongresi*, 107-114

- Öztürk K. (2003). *Isı Pompalarının Gıda Kurutmasında Kullanılması*. Bitirme Tezi İzmir; Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
- Perry R. H., Green D. W. Ve Maloney J. O. (Ed.) (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (6th ed). NY; Mc-Graw Hill.
- Prasertsan S. ve Saen-saby P. (1998). Heat Pump Drying of Agricultural Materials *Drying Technology*, 16(1&2), 235-250.
- Rahman M. S., Perera C. O. ve Thebaudb C. (1998). Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 30 (7), 485-491.
- Saçılık, K., Keskin R. ve Eliçin A. K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73, 231–238.
- Sonntag R. E., Borgnakke C. ve Van Wylen G. J. (2003). *Fundamentals of Thermodynamics* (6th ed.). NJ; Wiley.
- Tosun S. (2009). *Bazı Tarımsal Ürünler İçin Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi*. Doktora Tezi. İzmir; Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

## EKLER

### EK.1 Simgeler ve Kısaltmalar

Simgeler	Açıklamalar
$\phi_0$	Dış ortam havasının bağıl nemi (%)
$\phi_1$	Kurutucu çıkış havasının bağıl nemi (%)
$\phi_2$	Egzoz çıkışı sonrası sistem dolaşım havasının bağıl nemi (%)
$\phi_3$	Ön soğutma giriş havasının bağıl nemi (%)
$\phi_4$	Ön soğutma çıkış ve buharlaştırıcı giriş havasının bağıl nemi (%)
$\phi_5$	Buharlaştırıcı çıkış havasının bağıl nemi (%)
$\phi_6$	Ön ısıtma girişi karışım havasının bağıl nemi (%)
$\phi_7$	Ön ısıtma çıkış ve yoğuşturucu giriş havasının bağıl nemi (%)
$\phi_8$	Yoğuşturucu çıkış havasının bağıl nemi (%)
$\phi_9$	Kurutucu girişi üfleme havasının bağıl nemi (%)
$\eta$	Nem alma verimi
$\eta_{GK}$	Isı geri kazanım ünitesi verimi (%)
$\eta_k$	Kurutma etkinliği
$\eta_t$	Kurutucu ısıl etkinliği
$\eta_y$	Yakıt verimi
$\omega_0$	Dış ortam havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_1$	Kurutucu çıkış havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)

$\omega_2$	Egzoz çıkışı sonrası sistem dolaşım havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_3$	Ön soğutma girişi havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_4$	Ön soğutma çıkış ve buharlaştırıcı giriş havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_5$	Buharlaştırıcı çıkış havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_6$	Ön ısıtma girişi karışım havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_7$	Ön ısıtma çıkış ve yoğuşturucu giriş havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_8$	Yoğuşturucu çıkış havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$\omega_9$	Kurutucu girişi üfleme havasının özgül nemi (kg su/kg kuru hava)
$COP_{IP}$	Isı pompası etkinlik katsayısı
$h_0$	Dış ortam havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_1$	Kurutucu çıkış havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_2$	Egzoz çıkışı sonrası sistem dolaşım havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_3$	Ön soğutma girişi havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_4$	Ön soğutma çıkış ve buharlaştırıcı giriş havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_5$	Buharlaştırıcı çıkış havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_6$	Ön ısıtma girişi karışım havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_7$	Ön ısıtma çıkış ve yoğuşturucu giriş havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_8$	Yoğuşturucu çıkış havasının entalpisi (kJ/kg)



$h_9$	Kurutucu girişi üfleme havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_{yoğuşma}$	Buharlaştırıcıda uzaklaştırılan nemin entalpisi (kJ/kg)
KYDY	Kompresör yükü değişimi yüzdesi (%)
$\dot{m}_a$	Sistemde dolaşan toplam kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,1}$	Kurutucu ıkışı kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,2}$	Egzoz ıkışı sonrası kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,3}$	Ön soğutma girişi kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,4}$	Ön soğutma çıkışı ve buharlaştırıcı girişi kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,5}$	Buharlaştırıcı ıkışı kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,6}$	Ön ısıtma girişi karışımın kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,7}$	Ön ısıtma çıkışı ve yoğuşturucu girişi kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,8}$	Yoğuşturucu ıkışı kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,9}$	Kurutucu girişi kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,egzoz}$	Egzoz havası kuru hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{a,taze}$	Taze hava kuru hava debisi (kg/s)
$m_{buharlaşma}$	Üründen uzaklaştırılan nem miktarı (kg)
$\dot{m}_{buharlaşma}$	Üründen uzaklaştırılan nemin buharlaşma hızı (kg/s)
$m_{ıkış}$	Kurutucu ıkışı ürün kütlesi (kg)
$m_{giriş}$	Kurutucu girişi ürün kütlesi (kg)
$m_{kuru}$	Üründeki toplam kuru madde miktarı (kg)
$\dot{m}_{yoğuşma}$	Buharlaştırıcıda uzaklaştırılan havadaki nemin yoğuşma hızı (kg/s)

$\dot{m}_{v,kayıp}$	Hava giriş çıkışları sonrası sistemdeki su buhar kütesindeki değişim (kg/s)
MER	Kuruma hızı – Moisture Extraction Rate (kg/h)
$P$	Toplam atmosferik hava basıncı (kPa)
$P_a$	Kuru hava kısmi basıncı (kPa)
$P_v$	Su buharı kısmi basıncı (kPa)
$\dot{Q}_{GK}$	Geri kazanım yükü (kW)
$Q_H$	Isıtılan ortama verilen ısı miktarı (kJ)
$\dot{Q}_{kurutma}$	Kurutucu yükü (kW)
$Q_L$	Soğutulan ortamdan çekilen ısı miktarı (kJ)
$\dot{Q}_{ön-ısıtma}$	Ön ısıtma yükü (kW)
$\dot{Q}_{ön-soğutma}$	Ön soğutma yükü (kW)
SMER	Özgül nem alma hızı – Specific Moisture Extraction Rate (kg/kWh)
$T_0$	Dış ortam havasının sıcaklığı (°C)
$T_1$	Kurutucu çıkış havasının sıcaklığı (°C)
$T_2$	Egzoz çıkışı sonrası sistem dolaşım havasının sıcaklığı (°C)
$T_3$	Ön soğutma giriş havasının sıcaklığı (°C)
$T_4$	Ön soğutma çıkış ve buharlaştırıcı giriş havasının sıcaklığı (°C)
$T_5$	Buharlaştırıcı çıkış havasının sıcaklığı (°C)
$T_6$	Ön ısıtma girişi karışım havasının sıcaklığı (°C)
$T_7$	Ön ısıtma çıkış ve yoğuşturucu giriş havasının sıcaklığı (°C)

$T_8$	Yoğuşturucu çıkış havasının sıcaklığı (°C)
$T_9$	Kurutucu girişi üfleme havasının sıcaklığı (°C)
$T_i$	Kurutulacak ürünün kurutucu girişi sıcaklığı (°C)
$T_o$	Kurutulacak ürünün kurutucu çıkışı sıcaklığı (°C)
$t_{kurutma}$	Toplam kurutma zamanı (h)
$W$	Kurutulacak ürünün ıslak nemliliği (%)
$W_g$	Kompresörde harcanan net iş (kJ)
$W_i$	Kurutulacak ürünün kurutucu girişi ıslak nemliliği (%)
$W_o$	Kurutulacak ürünün kurutucu çıkışı ıslak nemliliği (%)
$X$	Kurutulacak ürünün kuru nemliliği (%)
$X_{cr}$	Kritik nem içeriği (%)
$\bar{X}$	Herhangi bir kuruma anında kurutulan ürünün ortalama nem içeriği (%)
$X^*$	Denge nem içeriği (%)

## EK.2 Bilgisayar Yazılımına Ait Kodlar

Private Sub Command1\_Click()

'-----Değişkenler-----'

Dim sicaklikKuruTermometreCelcius(9), sicaklikKuruTermometreKelvin(9),  
 bagilNem(9), ozgulNem(9), basinc(9), basincKismiBuhar(9),  
 basincDoymaBuhar(9), entalpi(9), kuruHavaDebisi(9)  
 Dim girisUrunMiktari, kurutmaSuresi, kurutucuGirisiIslakNemlilik,  
 kurutucuCikisiIslakNemlilik As Double

Dim kurutucuGirisiUrunSicakligi, kurutucuCikisiUrunSicakligi,  
 buharlastirilcakNemMiktari As Double

Dim kurumaHizi, buharlasmaDebisi, yogusmaDebisi, entalpiSu,  
 entalpiSuBuharlasma, gerekliIsilGuc, geriKazanimVerimi, geriKazanimYuku As  
 Double

Dim buharlastiriciYuku, etkinlikKatsayisi, kompresorYuku, yogusturucuYuku,  
 kompresorYukuOnceki, SMER As Double

Dim egzozHavasiDebisi, kayipBuharDebisi, bagilNemKurutucuCikisiMax,  
 denizSeviyesindenYukseklk, atmosferBasinci As Double

Dim urununOzgullIsisi As Double

Dim hesapSayisi As Integer

'-----

girisUrunMiktari = Val(Text1.Text)

kurutmaSuresi = Val(Text2.Text)

kurutucuGirisiIslakNemlilik = Val(Text3.Text) / 100

kurutucuCikisiIslakNemlilik = Val(Text4.Text) / 100

kurutucuGirisiUrunSicakligi = Val(Text5.Text)

kurutucuCikisiUrunSicakligi = Val(Text6.Text)

sicaklikKuruTermometreCelcius(9) = Val(Text7.Text)

sicaklikKuruTermometreKelvin(9) = sicaklikKuruTermometreCelcius(9) + 273.15

sicaklikKuruTermometreCelcius(0) = Val(Text16.Text)

sicaklikKuruTermometreKelvin(0) = sicaklikKuruTermometreCelcius(0) + 273.15

bagilNem(0) = Val(Text17.Text) / 100

bagilNem(5) = Val(Text10.Text) / 100

bagilNem(9) = Val(Text8.Text) / 100

bagilNemKurutucuCikisiMax = Val(Text27.Text) / 100

geriKazanimVerimi = Val(Text18.Text) / 100

etkinlikKatsayisi = Val(Text15.Text)

denizSeviyesindenYukseklk = Val(Text9.Text)

Call hesaplaAtmosferBasinci(atmosferBasinci, denizSeviyesindenYukseklk)

Call hesaplaBuharlastirilcakNemMiktari(buharlastirilcakNemMiktari,  
 girisUrunMiktari, kurutucuGirisiIslakNemlilik, kurutucuCikisiIslakNemlilik)  
 Text11.Text = Round(buharlastirilcakNemMiktari, 2)

Call hesaplaKurumaHizi(kurumaHizi, buharlastirilcakNemMiktari, kurutmaSuresi)  
 Text12.Text = Round(kurumaHizi, 3)

Call hesaplaBuharlasmaDebisi(buharlasmaDebisi, kurumaHizi)  
 Text13.Text = Round(buharlasmaDebisi, 6)

Call hesaplaGerekliIsilGuc(gerekliIsilGuc, buharlasmaDebisi,  
 kurutucuGirisiUrunSicakligi, kurutucuCikisiUrunSicakligi)  
 Text14.Text = Round(gerekliIsilGuc, 2)

'(9) havasının özelliklerinin hesaplanması-----

basincDoymaBuhar(9) = doymaBuharBasinci\_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(9))  
 basincKismiBuhar(9) = suBuharininKismiBasinci(bagilNem(9),  
 basincDoymaBuhar(9))  
 ozgulNem(9) = havanınOzgulNemi\_1(basincKismiBuhar(9), atmosferBasinci)  
 entalpi(9) = havanınEntalpisi(sicaklikKuruTermometreCelcius(9), ozgulNem(9))

'(0) havasının özelliklerinin hesaplanması-----

basincDoymaBuhar(0) = doymaBuharBasinci\_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(0))  
 basincKismiBuhar(0) = suBuharininKismiBasinci(bagilNem(0),  
 basincDoymaBuhar(0))  
 ozgulNem(0) = havanınOzgulNemi\_1(basincKismiBuhar(0), atmosferBasinci)  
 entalpi(0) = havanınEntalpisi(sicaklikKuruTermometreCelcius(0), ozgulNem(0))

'Üfleme havası debisi-----

yogunlukHava = (atmosferBasinci - basincKismiBuhar(9)) / (0.287 \*  
 sicaklikKuruTermometreKelvin(9))

kuruHavaDebisi(9) = (Val(Text26.Text) \* yogunlukHava) / 3600

'(1) havasının özelliklerinin hesaplanması-----

entalpi(1) = (buharlasmaDebisi \* kurutucuGirisiUrunSicakligi \* 4.186 +  
kuruHavaDebisi(9) \* entalpi(9)) / kuruHavaDebisi(9)

ozgulNem(1) = ozgulNem(9) + buharlasmaDebisi / kuruHavaDebisi(9)

sicaklikKuruTermometreCelcius(1) = havanınSicakligi(ozgulNem(1), entalpi(1))

sicaklikKuruTermometreKelvin(1) = sicaklikKuruTermometreCelcius(1) + 273.15

basincDoymaBuhar(1) = doymaBuharBasinci\_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(1))

bagilNem(1) = havanınBagilNemi\_2(ozgulNem(1), basincDoymaBuhar(1),  
atmosferBasinci)

If bagilNem(1) > bagilNemKurutucuCikisiMax Then

MsgBox "Üfleme debisi yetersiz. Verdiğiniz değeri kontrol ediniz" & vbCrLf &  
"Kurutucu çıkışı havanın bağıl nemi =" & Round(bagilNem(1) \* 100, 2) & "%" &  
vbCrLf & "(İzin verilen en yüksek değer =" & bagilNemKurutucuCikisiMax \*  
100 & "%)"

Exit Sub

End If

'-----

Text19.Text = Round(kuruHavaDebisi(9), 2)

kuruHavaDebisi(1) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(2) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(3) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(4) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(5) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(6) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(7) = kuruHavaDebisi(9)

kuruHavaDebisi(8) = kuruHavaDebisi(9)

'-----

'(5) havasının özelliklerinin hesaplanması-----

$$\text{ozgulNem}(5) = \text{ozgulNem}(9)$$

$$\text{basincDoymaBuhar}(5) = \text{doymaBuharBasinci}_3(\text{bagilNem}(5), \text{ozgulNem}(5), \text{atmosferBasinci})$$

$$\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(5) = \text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(1)$$

$$\text{Call duzsekan}_2(\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(5), \text{basincDoymaBuhar}(5))$$

$$\text{entalpi}(5) = \text{havaninEntalpisi}(\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(5), \text{ozgulNem}(5))$$

'-----

$$\text{entalpi}(2) = \text{entalpi}(1)$$

$$\text{entalpi}(3) = \text{entalpi}(2)$$

$$\text{entalpi}(6) = \text{entalpi}(5) \text{ İTERASYONLARDA DEĞİŞECEK}$$

$$\text{entalpi}(8) = \text{entalpi}(9)$$

$$\text{ozgulNem}(2) = \text{ozgulNem}(1)$$

$$\text{ozgulNem}(3) = \text{ozgulNem}(2)$$

$$\text{ozgulNem}(4) = \text{ozgulNem}(3)$$

$$\text{ozgulNem}(6) = \text{ozgulNem}(5) \text{ İTERASYONLARDA DEĞİŞECEK}$$

$$\text{ozgulNem}(8) = \text{ozgulNem}(9)$$

$$\text{bagilNem}(2) = \text{bagilNem}(1)$$

$$\text{bagilNem}(3) = \text{bagilNem}(2)$$

$$\text{bagilNem}(6) = \text{bagilNem}(5) \text{ İTERASYONLARDA DEĞİŞECEK}$$

$$\text{bagilNem}(8) = \text{bagilNem}(9)$$

$$\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(2) = \text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(1)$$

$$\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(3) = \text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(2)$$

$$\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(6) = \text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(5)$$

İTERASYONLARDA DEĞİŞECEK

$$\text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(8) = \text{sicaklikKuruTermometreCelcius}(9)$$

'(4) havasının özelliklerinin hesaplanması-----

```

sicaklikKuruTermometreCelcius(4) = sicaklikKuruTermometreCelcius(3) -
    geriKazanimVerimi * (sicaklikKuruTermometreCelcius(3) -
        sicaklikKuruTermometreCelcius(6))
sicaklikKuruTermometreKelvin(4) = sicaklikKuruTermometreCelcius(4) + 273.15
basincDoymaBuhar(4) = doymaBuharBasinci_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(4))
bagilNem(4) = havanınBagilNemi_2(ozgulNem(4), basincDoymaBuhar(4),
    atmosferBasinci)
entalpi(4) = havanınEntalpisi(sicaklikKuruTermometreCelcius(4), ozgulNem(4))

```

```

'Ön Isıtma / Ön Soğutma yükünün hesaplanması-----
geriKazanimYuku = kuruHavaDebisi(3) * (entalpi(3) - entalpi(4))

```

```

'Buharlaştırıcı yükünün hesaplanması-----
Call hesaplaEntalpiSuDoymusSivi(entalpiSu, sicaklikKuruTermometreCelcius(5))
yogusmaDebisi = buharlasmaDebisi
buharlastiriciYuku = kuruHavaDebisi(4) * (entalpi(4) - entalpi(5)) - yogusmaDebisi
    * entalpiSu
'Text21.Text = Round(buharlastiriciYuku, 2)

```

```

'Kompresör yükünün hesaplanması-----
kompresorYuku = buharlastiriciYuku / (etkinlikKatsayisi - 1)
'Text22.Text = Round(kompresorYuku, 2)

```

```

'-----//Iterationların Başlatılması//-----
Dim iterasyonSayisiMax As Integer
Dim kompresorYukuDegisimYuzdesi As Double
iterasyonSayisiMax = 500

```

```

For i = 1 To iterasyonSayisiMax
    kompresorYukuOnceki = kompresorYuku
    Call hesaplaEntalpiSuDoymusSivi(entalpiSu5,
        sicaklikKuruTermometreCelcius(5))

```



Call hesaplaEntalpiSuDoymusSivi(entalpiSu1, kurutucuGirisiUrunSicakligi)  
 egzozHavasiDebisi = (kompresorYuku - buharlasmaDebisi \* (entalpiSu5 -  
 entalpiSu1)) / (entalpi(1) - entalpi(0))  
 kuruHavaDebisi(0) = egzozHavasiDebisi  
 kuruHavaDebisi(2) = kuruHavaDebisi(1) - egzozHavasiDebisi  
 kuruHavaDebisi(3) = kuruHavaDebisi(2)  
 kuruHavaDebisi(4) = kuruHavaDebisi(3)  
 kuruHavaDebisi(5) = kuruHavaDebisi(4)  
 kayipBuharDebisi = egzozHavasiDebisi \* (ozgulNem(1) - ozgulNem(0))  
 yogusmaDebisi = buharlasmaDebisi - kayipBuharDebisi  
 ozgulNem(5) = ozgulNem(6) + kuruHavaDebisi(0) \* (ozgulNem(6) -  
 ozgulNem(0)) / kuruHavaDebisi(5)  
 basincDoymaBuhar(5) = doymaBuharBasinci\_3(bagilNem(5), ozgulNem(5),  
 atmosferBasinci)  
 sicaklikKuruTermometreCelcius(5) = sicaklikKuruTermometreCelcius(1)  
 Call duzsekan\_2(sicaklikKuruTermometreCelcius(5), basincDoymaBuhar(5))  
 entalpi(5) = havanınEntalpisi(sicaklikKuruTermometreCelcius(5), ozgulNem(5))  
 entalpi(6) = (kuruHavaDebisi(5) \* entalpi(5) + kuruHavaDebisi(0) \* entalpi(0)) /  
 (kuruHavaDebisi(0) + kuruHavaDebisi(5))  
 sicaklikKuruTermometreCelcius(6) = havanınSicakligi(ozgulNem(6), entalpi(6))  
 sicaklikKuruTermometreKelvin(6) = sicaklikKuruTermometreCelcius(6) + 273.15  
 basincDoymaBuhar(6) =  
 doymaBuharBasinci\_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(6))  
 bagilNem(6) = havanınBagilNemi\_2(ozgulNem(6), basincDoymaBuhar(6),  
 atmosferBasinci)  
 sicaklikKuruTermometreCelcius(4) = sicaklikKuruTermometreCelcius(3) -  
 geriKazanımVerimi \* (sicaklikKuruTermometreCelcius(3) -  
 sicaklikKuruTermometreCelcius(6))  
 sicaklikKuruTermometreKelvin(4) = sicaklikKuruTermometreCelcius(4) + 273.15  
 basincDoymaBuhar(4) =  
 doymaBuharBasinci\_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(4))

```

bagilNem(4) = havanınBagilNemi_2(ozgulNem(4), basincDoymaBuhar(4),
atmosferBasinci)
entalpi(4) = havanınEntalpisi(sicaklikKuruTermometreCelcius(4), ozgulNem(4))
geriKazanimYuku = kuruHavaDebisi(3) * (entalpi(3) - entalpi(4))
Call hesaplaEntalpiSuDoymusSivi(entalpiSu, sicaklikKuruTermometreCelcius(5))
buharlastiriciYuku = kuruHavaDebisi(4) * (entalpi(4) - entalpi(5)) -
yogusmaDebisi * entalpiSu
kompresorYuku = buharlastiriciYuku / (etkinlikKatsayisi - 1)
kompresorYukuDegisimYuzdesi = Abs(kompresorYuku - kompresorYukuOnceki)
/ kompresorYukuOnceki
If kompresorYukuDegisimYuzdesi < 0.00001 Then Exit For

```

Next i

'-----//////////////İterasyonların Sonlandırılması////////////////////---

'(7) havasının özelliklerinin hesaplanması-----

```

ozgulNem(7) = ozgulNem(6)
entalpi(7) = geriKazanimYuku / kuruHavaDebisi(6) + entalpi(6)
sicaklikKuruTermometreCelcius(7) = havanınSicakligi(ozgulNem(7), entalpi(7))
sicaklikKuruTermometreKelvin(7) = sicaklikKuruTermometreCelcius(7) + 273.15
basincDoymaBuhar(7) = doymaBuharBasinci_1(sicaklikKuruTermometreKelvin(7))
bagilNem(7) = havanınBagilNemi_2(ozgulNem(7), basincDoymaBuhar(7),
atmosferBasinci)
Text21.Text = Round(buharlastiriciYuku, 2)
Text22.Text = Round(kompresorYuku, 2)
Text24.Text = Round(egzozHavasiDebisi, 5)
yogusturucuYuku = kompresorYuku + buharlastiriciYuku
Text23.Text = Round(yogusturucuYuku, 2)
Text20.Text = Round(geriKazanimYuku, 2)
Text29.Text = Round(yogusmaDebisi, 6)
Call hesaplaSMER(SMER, buharlastirilcakNemMiktari, kompresorYuku,
kurutmaSuresi)

```

```
Text25.Text = Round(SMER, 2)
```

```
SSTab1.Tab = 1
```

```
'Sonuçların tabloya yerleştirilmesi-----
```

```
For i = 1 To 10
```

```
    Form1.MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 1) = Round(sicaklikKuruTermometreCelcius(i  
    - 1), 2)
```

```
    Form1.MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 2) = Round(entalpi(i - 1), 2)
```

```
    Form1.MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 3) = Round(ozgulNem(i - 1), 4)
```

```
    Form1.MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 4) = Round(bagilNem(i - 1) * 100, 2)
```

```
Next i
```

```
'-----
```

```
If hesapSayisi = 0 Then
```

```
    hesapSayisi = 1
```

```
Else
```

```
    hesapSayisi = hesapSayisi + 1
```

```
End If
```

```
hesapSayisi = Val(Text28.Text)
```

```
Form1.MSFlexGrid2.Rows = hesapSayisi + 1
```

```
'-----
```

```
With Form1.MSFlexGrid2
```

```
    .TextMatrix(hesapSayisi, 0) = hesapSayisi
```

```
    .TextMatrix(hesapSayisi, 1) = girisUrunMiktari
```

```
    .TextMatrix(hesapSayisi, 2) = kurutmaSuresi
```

```
    .TextMatrix(hesapSayisi, 3) = kurutucuGirisiIslakNemlilik
```

```
End With
```

```
Text28.Text = hesapSayisi + 1
```

```
End Sub
```

```
'-----
Public Sub hesaplaAtmosferBasinci(paramAtmosferBasinci,
    paramDenizSeviyesindenYukseklk)
```

```
    paramAtmosferBasinci = 101.325 * (1 - 2.25577 * 10 ^ (-5) *
        paramDenizSeviyesindenYukseklk) ^ 5.2559
```

```
End Sub
```

```
'-----
Public Sub hesaplaSMER(paramSMER, paramBuharlastirilcakNemMiktari,
    paramKompresorYuku, paramKurutmaSuresi)
```

```
    paramSMER = paramBuharlastirilcakNemMiktari / paramKompresorYuku /
        paramKurutmaSuresi
```

```
End Sub
```

```
'-----
Public Sub hesaplaUflemeHavasiDebisi(paramUflemeHavasiDebisi,
    paramBuharlasmaDebisi, paramOzgulNemKurutucuCikisi,
    paramOzgulNemKurutucuGirisi)
```

```
    paramUflemeHavasiDebisi = paramBuharlasmaDebisi /
        (paramOzgulNemKurutucuCikisi - paramOzgulNemKurutucuGirisi)
```

```
End Sub
```

```
'-----
Public Sub hesaplaBuharlastirilcakNemMiktari(paramBuharlastirilcakNemMiktari,
    paramGirisUrunMiktari, paramKurutucuGirisiIslakNemlilik,
    paramKurutucuCikisiIslakNemlilik)
```

```
    kuruUrunMiktari = paramGirisUrunMiktari * (1 -
        paramKurutucuGirisiIslakNemlilik)
```

```
    paramcikisUrunMiktari = kuruUrunMiktari / (1 -
        paramKurutucuCikisiIslakNemlilik)
```

```
paramBuharlastirilcakNemMiktari = paramGirisUrunMiktari -
    paramcikisUrunMiktari
```

```
End Sub
```

```
'-----
```

```
Public Sub hesaplaKurumaHizi(paramKurumaHizi,
    paramBuharlastirilcakNemMiktari, paramKurutmaSuresi)
```

```
paramKurumaHizi = paramBuharlastirilcakNemMiktari / paramKurutmaSuresi
```

```
End Sub
```

```
'-----
```

```
Public Sub hesaplaBuharlasmaDebisi(paramBuharlasmaDebisi, paramKurumaHizi)
```

```
paramBuharlasmaDebisi = paramKurumaHizi / 3600
```

```
End Sub
```

```
'-----
```

```
Public Sub hesaplaGerekliIsilGuc(paramGerekliIsilGuc, paramBuharlasmaDebisi,
    paramKurutucuGirisiUrunSicakligi, paramKurutucuCikisiUrunSicakligi)
```

```
Dim entalpiSuBuharlasma As Double
```

```
Call hesaplaEntalpiSuBuharlasma(entalpiSuBuharlasma,
    paramKurutucuCikisiUrunSicakligi)
```

```
paramGerekliIsilGuc = paramBuharlasmaDebisi * (4.186 *
```

```
(paramKurutucuCikisiUrunSicakligi - paramKurutucuGirisiUrunSicakligi) +
    entalpiSuBuharlasma)
```

```
End Sub
```

```
'-----
```

```
Public Sub hesaplaEntalpiSuBuharlasma(paramEntalpiSuBuharlasma,
    paramSicaklikKuruTermometre)
```

```
Dim entalpiSuDoymusBuhar, entalpiSuDoymusSivi As Double
```

```
Call hesaplaEntalpiSuDoymusBuhar(entalpiSuDoymusBuhar,
    paramSicaklikKuruTermometre)
```

```

Call hesaplaEntalpiSuDoymusSivi(entalpiSuDoymusSivi,
    paramSicaklikKuruTermometre)
paramEntalpiSuBuharlasma = entalpiSuDoymusBuhar - entalpiSuDoymusSivi
End Sub

'-----
Public Sub hesaplaEntalpiSuDoymusSivi(paramEntalpiSuDoymusSivi,
    paramSicaklikKuruTermometre)
paramEntalpiSuDoymusSivi = paramSicaklikKuruTermometre * 4.186
End Sub

'-----
Public Sub hesaplaEntalpiSuDoymusBuhar(paramEntalpiSuDoymusBuhar,
    paramSicaklikKuruTermometre)
paramEntalpiSuDoymusBuhar = 2500.89 +
    suyunOzguIsisi(paramSicaklikKuruTermometre) *
    paramSicaklikKuruTermometre
End Sub

'-----
Public Sub duzsekan_1(xr, paramBagilNem, paramHavaninEntalpisi,
    paramAtmosferBasinci)
d = 0.02
iter = 500
xr1 = xr + d * xr
For i = 1 To iter
    If f1(xr1, paramBagilNem, paramHavaninEntalpisi, paramAtmosferBasinci) =
        f1(xr, paramBagilNem, paramHavaninEntalpisi, paramAtmosferBasinci) Then
        Exit For
    xr1 = xr + d * xr
xreski = xr

```

```

xr = xr - ((d * xr * f1(xr, paramBagilNem, paramHavaninEntalpsi,
paramAtmosferBasinci)) / (f1(xr1, paramBagilNem, paramHavaninEntalpsi,
paramAtmosferBasinci) - f1(xr, paramBagilNem, paramHavaninEntalpsi,
paramAtmosferBasinci)))
ea = ((xr - xreski) / xr) * 100
If Abs(ea) < 0.000000000000001 Then Exit For
Next i
End Sub

'-----
Public Sub duzsekan_2(xr, paramDoymaBuharBasinci)
d = 0.02
iter = 500
xr1 = xr + d * xr
For i = 1 To iter
If f2(xr1, paramDoymaBuharBasinci * 1000) = f2(xr, paramDoymaBuharBasinci
* 1000) Then Exit For
xr1 = xr + d * xr
xreski = xr
xr = xr - ((d * xr * f2(xr, paramDoymaBuharBasinci * 1000)) / (f2(xr1,
paramDoymaBuharBasinci * 1000) - f2(xr, paramDoymaBuharBasinci * 1000)))
ea = ((xr - xreski) / xr) * 100
If Abs(ea) < 0.000000000000001 Then Exit For
Next i
End Sub

'-----
Public Function f1(T, FI, h, paramAtmosferBasinci)
C8 = -5800.2206
C9 = 1.3914993
C10 = -0.048640239
C11 = 0.000041764768

```

C12 = -0.000000014452093

C13 = 6.5459673

Pws = Exp((C8 / (T + 273.15)) + (C9) + (C10 \* (T + 273.15)) + (C11 \* (T + 273.15)  
^ 2) + (C12 \* (T + 273.15) ^ 3) + (C13 \* Log(T + 273.15))) / 1000

W = 0.621945 \* (FI \* Pws) / (paramAtmosferBasinci - (FI \* Pws))

f1 = 1.006 \* T + 2501 \* W + 1.86 \* W \* T - h

End Function

'-----

Public Function f2(T, Pws)

C8 = -5800.2206

C9 = 1.3914993

C10 = -0.048640239

C11 = 0.000041764768

C12 = -0.000000014452093

C13 = 6.5459673

f2 = (C8 / (T + 273.15)) + (C9) + (C10 \* (T + 273.15)) + (C11 \* (T + 273.15) ^ 2) +  
(C12 \* (T + 273.15) ^ 3) + (C13 \* Log(T + 273.15)) - Log(Pws)

End Function

'-----

Public Function suyunOzgullIsisi(paramSicaklikKuruTermometre)

Dim teta, ortalamaSicaklik As Double

ortalamaSicaklik = paramSicaklikKuruTermometre / 2

teta = (ortalamaSicaklik + 273.15) / 100

suyunOzgullIsisi = (143.05 - 183.54 \* teta ^ 0.25 + 82.751 \* teta ^ 0.5 - 3.6989 \* teta)  
/ 18

End Function

'-----

Public Function doymaBuharBasinci\_1(paramSicaklikKuruTermometre)



C8 = -5800.2206

C9 = 1.3914993

C10 = -0.048640239

C11 = 0.000041764768

C12 = -0.000000014452093

C13 = 6.5459673

'----- Birim (kPa) -----'

doymaBuharBasinci\_1 = Exp((C8 / paramSicaklikKuruTermometre) + (C9) + (C10  
 \* paramSicaklikKuruTermometre) + (C11 \* paramSicaklikKuruTermometre ^ 2)  
 + (C12 \* paramSicaklikKuruTermometre ^ 3) + (C13 \*  
 Log(paramSicaklikKuruTermometre))) / 1000

'----- Birim (kPa) -----'

End Function

'-----'

Public Function doymaBuharBasinci\_2(paramSuBuharininKismiBasinci,  
 paramBagilNem)

doymaBuharBasinci\_2 = paramSuBuharininKismiBasinci / paramBagilNem

End Function

'-----'

Public Function doymaBuharBasinci\_3(paramBagilNem, paramOzgulNem,  
 paramToplamBasinc)

doymaBuharBasinci\_3 = paramOzgulNem \* paramToplamBasinc / (0.621945 \*  
 paramBagilNem + paramOzgulNem \* paramBagilNem)

End Function

'-----'

Public Function suBuharininKismiBasinci(paramBagilNem,  
 paramDoymaBuharBasinci)

suBuharininKismiBasinci = paramBagilNem \* paramDoymaBuharBasinci

End Function

```

'-----
Public Function havanınOzgulNemi_1(paramSuBuharininKismiBasinci,
    paramToplamBasinc)
havininOzgulNemi_1 = 0.621945 * paramSuBuharininKismiBasinci /
    (paramToplamBasinc - paramSuBuharininKismiBasinci)
End Function

'-----
Public Function havanınOzgulNemi_2(paramDoymaBuharBasinci,
    paramToplamBasinc, paramBagilNem)
havininOzgulNemi_2 = 0.621945 * paramBagilNem * paramDoymaBuharBasinci /
    (paramToplamBasinc - paramBagilNem * paramDoymaBuharBasinci)
End Function

'-----
Public Function havanınBagilNemi_1(paramDoymaBuharBasinci,
    paramSuBuharininKismiBasinci)
havininBagilNemi_1 = paramSuBuharininKismiBasinci /
    paramDoymaBuharBasinci
End Function

'-----
Public Function havanınBagilNemi_2(paramOzgulNem, paramDoymaBuharBasinci,
    paramToplamBasinc)
havininBagilNemi_2 = paramOzgulNem * paramToplamBasinc / (0.621945 +
    paramOzgulNem) / paramDoymaBuharBasinci
End Function

'-----
Public Function havanınEntalpisi(paramSicaklikKuruTermometre, paramOzgulNem)
havininEntalpisi = 1.006 * paramSicaklikKuruTermometre + paramOzgulNem *
    (2501 + 1.86 * paramSicaklikKuruTermometre)

```

End Function

'-----

Public Function havaninSicakligi(paramOzgulNem, paramHavaninEntalpisi)

havaninSicakligi = (paramHavaninEntalpisi - 2501 \* paramOzgulNem) / (1.006 +  
1.86 \* paramOzgulNem)

End Function